

Polyelektromyografische Untersuchung der Rumpfmuskulatur bei Sängern

-

Statusbestimmung zum Studienbeginn

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

**von Stella Jähkel
geboren am 07.09.1983 in Dresden**

Gutachter

1. PD Dr. Christoph Anders
Klinik für Unfall-/ Hand- und Wiederherstellungschirurgie, Universitätsklinikum Jena
2. Prof. Dr. Eiselt
Dekanat der medizinischen Fakultät, Universitätsklinikum Jena
3. Prof. Dr. med. Bernhard Richter
Zentrum für Musikermedizin, Universitätsklinikum Freiburg

Tag der öffentlichen Verteidigung: 07.02.2014

Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog-digital
Ag/AgCl	Silber/Silberchlorid
BMI	body-mass-index
BWS	Brustwirbelsäule
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
DP	Diaphragma
Dr.	Doktor
EI	Musculus erector spinae pars iliocostalis
EKG	Elektrokardiogramm
EL	Musculus erector spinae pars longissimus
EMG	Elektromyogramm
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ICO5	Musculi intercostales des 5. Interkostalraumes
ICO8	Musculi intercostales des 8. Interkostalraumes
Kg	Kilogramm
krit.	kritische
LD	Musculus latissimus dorsi
li.	links
LWS	Lendenwirbelsäule
M.	Musculus
MF	Musculus multifidus
mittl.	mittlere
Mm.	Musculi
MVC	Maximum voluntary contraction
OE	Musculus obliquus externus
OEMG	Oberflächen-Elektromyogramm
OI	Musculus obliquus internus
PM	Musculus pectoralis major
QL	Musculus quadratus lumborum
RA	Musculus rectus abdominis

re.	rechts
RC-Filter	Elektronische Filtereinheit mit eingebautem Widerstand und Kondensator
rms	Root-mean-square
RZ	Rangzahl
SA	Musculus serratus anterior
SCM	Musculus sternocleidomastoideus
SIAS	Spina iliaca anterior superior
SIPS	Spina iliaca posterior superior
TD	Musculus trapezius pars descendens
TU	Technische Universität
z.B.	zum Beispiel

1 ZUSAMMENFASSUNG	10
2 EINLEITUNG	12
2.1 Grundlagen	13
2.1.1 Atemmechanik der physiologischen Atmung	13
2.1.2 Klangerzeugung und Atmung	15
2.2 Atmung und Gesang	17
2.3 Atmung und Stütze	19
2.4 Bisherige Erkenntnisse	20
2.5 EMG	23
2.6 Betrachtete Muskeln	26
2.6.1 Atemmuskulatur	27
2.6.2 Bauchmuskulatur	28
2.6.3 Nacken/Halsmuskulatur	30
2.6.4 Thoraxmuskulatur	31
2.6.5 Tiefe Rückenmuskulatur	32
2.6.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur	32
2.7 Fragestellungen der Arbeit	34
3 MATERIAL UND METHODEN	35
3.1 Probanden	36
3.2 Untersuchung	38
3.2.1 Untersuchungsaufbau	38
3.2.2 Untersuchungsablauf	44
3.3 Datenaufzeichnung	44
3.4 Datenverarbeitung	44
3.4.1 Vorverarbeitung der Daten	44
3.4.2 Allgemeine Datenverarbeitungen	46
3.4.3 Spezielle Datenverarbeitungen	47
3.5 Statistik	50
3.5.1 Reliabilität	50

3.5.2	Statische Betrachtungen	50
3.5.3	Dynamische Betrachtungen	51
4	ERGEBNISSE	52
4.1	Statische Betrachtungen	52
4.1.1	Vokalausgleich	52
4.1.1.1	Muskelaktivitäten über die fünf Vokalbereiche	52
4.1.1.1.1	mittlere Muskelaktivitäten über die fünf Vokalbereiche	52
4.1.1.1.2	Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf das Referenzmaximum	54
4.1.1.1.3	Intermuskuläre Koordination über die 5 Vokalbereiche	55
4.1.1.2	Geschlechtsspezifische Unterschiede verschiedener Bezugsparameter	57
4.1.1.2.1	Muskuläre Aktivität relativ zur Referenz	58
4.1.1.2.2	Intermuskuläre Koordination	59
4.1.2	Dreiklang	60
4.1.2.1	Muskelaktivitäten über die drei Bereiche des Dreiklangs	60
4.1.2.1.1	mittlere Muskelaktivitäten über die drei Bereiche	60
4.1.2.1.2	Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf Referenzmaximum	61
4.1.2.1.3	Intermuskuläre Koordination	62
4.1.2.2	Geschlechtsspezifische Unterschiede verschiedener Parameter	64
4.1.2.2.1	Muskuläre Aktivität relativ zur Referenz	64
4.1.2.2.2	Intermuskuläre Koordination	65
4.1.3	Tonleiter	67
4.1.3.1	Muskelaktivitäten über den Endtonbereich der Tonleiter	67
4.1.3.1.1	mittlere Muskelaktivitäten	67
4.1.3.1.2	Relative Muskelaktivitäten in Bezug auf das Referenzmaximum	67
4.1.3.1.3	Intermuskuläre Koordination	68
4.1.3.2	Geschlechtsspezifische Unterschiede verschiedener Parameter	69
4.1.3.2.1	muskuläre Aktivität relativ zur Referenz	69
4.1.3.2.2	Intermuskuläre Koordination	70
4.1.4	Schwellton	72
4.1.4.1	Muskelaktivitäten über die drei Schwelltonbereiche	72
4.1.4.1.1	mittlere Muskelaktivitäten über die drei Bereiche	72
4.1.4.1.2	Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf das Referenzmaximum	73
4.1.4.1.3	Intermuskuläre Koordination	74
4.1.4.2	Geschlechtsspezifische Unterschiede für verschiedene Bezugsparameter	76
4.1.4.2.1	Muskuläre Aktivität relativ zur Referenz	76
4.1.4.2.2	Intermuskuläre Koordination	77
4.2	Dynamische Betrachtungen	79
4.2.1	Inspiration	79
4.2.1.1	Reliabilitätsanalyse	79
4.2.1.1.1	Reliabilität Bandauslenkungen	79
4.2.1.1.2	Reliabilität Muskulatur	80
4.2.1.2	Die Inspiration am Beispiel der Schwellton-Übung	80
4.2.1.2.1	Bandauslenkungen	81

4.2.1.2.2	Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über die Einatemphase	82
4.2.1.2.2.1	Atemmuskulatur	82
4.2.1.2.2.2	Bauchmuskulatur	82
4.2.1.2.2.3	Hals-/Nackermuskulatur	83
4.2.1.2.2.4	Thoraxmuskulatur	83
4.2.1.2.2.5	tiefe Rückenmuskulatur	84
4.2.1.2.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	84
4.2.1.2.3	Geschlechtsspezifische Unterschiede	86
4.2.1.2.3.1	Bandauslenkungen	86
4.2.1.2.3.2	Muskulatur	87
4.2.2	Übungen	90
4.2.2.1	Vokalausgleich	90
4.2.2.1.1	Bandauslenkungen	90
4.2.2.1.2	Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über den Vokalausgleich	91
4.2.2.1.2.1	Atemmuskulatur	91
4.2.2.1.2.2	Bauchmuskulatur	92
4.2.2.1.2.3	Hals-/Nackermuskulatur	92
4.2.2.1.2.4	Thoraxmuskulatur	92
4.2.2.1.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur	93
4.2.2.1.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	93
4.2.2.1.3	Geschlechtsspezifische Unterschiede	95
4.2.2.1.3.1	Bandauslenkungen	95
4.2.2.1.3.2	Muskulatur	95
4.2.2.2	Dreiklang	99
4.2.2.2.1	Bandauslenkungen	99
4.2.2.2.2	Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über den Dreiklang	99
4.2.2.2.2.1	Atemmuskulatur	99
4.2.2.2.2.2	Bauchmuskulatur	100
4.2.2.2.2.3	Hals-/Nackermuskulatur	100
4.2.2.2.2.4	Thoraxmuskulatur	101
4.2.2.2.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur	101
4.2.2.2.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	102
4.2.2.2.3	Geschlechtsspezifische Unterschiede	104
4.2.2.2.3.1	Bandauslenkungen	104
4.2.2.2.3.2	Muskulatur	104
4.2.2.3	Tonleiter	108
4.2.2.3.1	Bandauslenkungen	108
4.2.2.3.2	Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über die Tonleiter	109
4.2.2.3.2.1	Atemmuskulatur	109
4.2.2.3.2.2	Bauchmuskulatur	109
4.2.2.3.2.3	Hals-/Nackermuskulatur	110
4.2.2.3.2.4	Thoraxmuskulatur	110
4.2.2.3.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur	111
4.2.2.3.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	111
4.2.2.3.3	Geschlechtsspezifische Unterschiede	114
4.2.2.3.3.1	Bandauslenkungen	114
4.2.2.3.3.2	Muskulatur	114
4.2.2.4	Schwellton	118
4.2.2.4.1	Bandauslenkungen	118
4.2.2.4.2	Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über den Schwellton	119
4.2.2.4.2.1	Atemmuskulatur	119
4.2.2.4.2.2	Bauchmuskulatur	119
4.2.2.4.2.3	Hals-/Nackermuskulatur	120
4.2.2.4.2.4	Thoraxmuskulatur	120
4.2.2.4.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur	120
4.2.2.4.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	121
4.2.2.4.3	Geschlechtsspezifische Unterschiede	123
4.2.2.4.3.1	Bandauslenkungen	123
4.2.2.4.3.2	Muskulatur	123

5 DISKUSSION	127
5.1 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	127
5.1.1 Einatmung	127
5.1.1.1 Atemmuster	127
5.1.1.2 Atemmuskulatur	128
5.1.1.3 Bauchmuskulatur	129
5.1.1.4 Hals-/Nackenmuskulatur	129
5.1.1.5 Thoraxmuskeln	130
5.1.1.6 Tiefe Rückenmuskulatur	131
5.1.1.7 Oberflächliche Rückenmuskulatur	131
5.1.1.8 Zusammenfassende Überlegungen für die Einatmung	131
5.1.2 Übungen	133
5.1.2.1 Atemmuster	133
5.1.2.2 Atemmuskulatur	133
5.1.2.3 Bauchmuskulatur	134
5.1.2.4 Hals-/Nackenmuskulatur	136
5.1.2.5 Thoraxmuskulatur	137
5.1.2.6 Tiefe Rückenmuskulatur	138
5.1.2.7 Oberflächliche Rückenmuskulatur	139
5.1.2.8 Zusammenfassende Überlegungen für die Phonation	139
5.2 Fragestellungen der Einleitung	141
5.2.1 Hypothese 1:	141
Männliche und weibliche Probanden zeigen starke Unterschiede in ihren muskulären Koordinationsmustern und die Frauen zeigen grundsätzlich höhere muskuläre Beanspruchungsniveaus.	141
5.2.1.1 Relativ zur Referenz	141
5.2.1.2 Atemmuster	143
5.2.1.3 intermuskuläre Koordination	144
5.2.1.4 Übungsspezifisches Maximum	145
5.2.1.5 Zusammenfassung	147
5.2.2 Hypothese 2:	147
Die Studenten sind noch nicht in der Lage für die sängerische Einatmung ein reproduzierbares Atem- und muskuläres Koordinationsmuster zu präsentieren	147
5.2.3 Hypothese 3:	148
Im Verlauf der Untersuchung tritt über die Übungen hinweg eine muskuläre Ermüdung ein, die sich darin äußert, dass das Beanspruchungsniveau der einzelnen Muskeln über den zeitlichen Verlauf ansteigt.	148
5.2.4 Hypothese 4:	151
Die Koordinationsmuster der Phonation zeigen eine starke interindividuelle Varianz	151

5.3	Fehlerbetrachtungen	153
5.3.1	Probanden	153
5.3.2	Untersuchungsaufbau	154
5.3.3	Untersuchungsablauf	155
5.3.4	Elektrodenpositionierung	155
5.4	Überlegungen zur Messwerterfassung und Auswertung	156
5.4.1	Ermittlung der Referenzwerte	156
5.4.2	Anzahl der Wiederholungen	157
5.4.3	Unterteilung der Betrachtungszeiträume (dynamisch)	158
5.5	Schlussfolgerung und Ausblick	159
6	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	161
7	ANHANG	170

1 Zusammenfassung

Ziel einer professionellen Gesangsausbildung ist das Erlernen einer Technik, die es ermöglicht, durch einen kontrollierten, die Stimmklappen zum Schwingen anregenden Luftstrom einen ausgewogenen Ton zu generieren. Dieser soll sowohl in Lautstärke als auch in Klangfarbe und Intensität an die zu singenden Gesangspassagen angepasst sein. Im Zusammenhang mit diesem Lernprozess wird immer wieder vom Begriff der „Stütze“ gesprochen. Diese wird oft mit metaphorischen Bezeichnungen wie „aus dem unteren Rücken stützen“ umschrieben, um den Studenten einen Eindruck zu vermitteln, welche Muskelpartien an der Generierung dieser so genannten Stütze beteiligt sind. Die Atemstütze als Voraussetzung für die Klangproduktion der menschlichen Gesangsstimme kann jedoch bisher kaum durch physiologische Daten belegt werden.

Die vorliegende Arbeit evaluiert die mit der Atemstütze verbundenen muskulären Koordinationsmuster während des Singens am Beispiel von vier gesangstechnischen Übungen (Vokalausgleich, Dreiklang, Staccato-Tonleiter, Schwellton). In der durchgeführten Untersuchung wurde dafür bei 23 Gesangsstudenten im ersten Studienjahr ein Oberflächen-Elektromyogramm (OEMG) von 15 paarigen Muskeln der Rumpfmuskulatur aufgezeichnet. Zusätzlich wurden außerdem die Thoraxexkursionen im Bereich von Brust, Flanken und Bauch durch drei dehnbare Bänder registriert. Die Erfassung der Daten erfolgte während standardisierter Gesangsübungen. Die anschließende Analyse der Daten erfolgte situationsbezogen, also jeweils innerhalb gesangstechnisch relevanter Bereiche der einzelnen Übungen.

Die registrierten muskulären Aktivitäten wurden aufgrund ihres stochastischen Charakters und der damit verbundenen starken interindividuellen Unterschiede mithilfe von festgelegten Bezugsgrößen normiert, um eine interindividuelle Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Zu diesen Normierungsparametern gehörten das Referenzmaximum, generiert in einer maximal forcierten In- und Expiration (zur Definition des Beanspruchungsniveaus), das übungsspezifische Maximum und die intermuskuläre Koordination als anteilige Aktivierung bezogen auf die muskuläre Gesamtaktivität zu einem definierten Zeitpunkt. Die Bandauslenkungen wurden individuell kalibriert.

Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, ob bei Studenten im ersten Studienjahr schon Koordinationsmuster der Muskelaktivitäten sowohl in Bezug auf die sängerische Einatmung als auch bei der Ausführung der einzelnen Gesangsübungen existieren.

Des Weiteren wurde geprüft, inwiefern das Beanspruchungsniveau der einzelnen Muskeln vom zeitlichen Verlauf der Übungen bzw. von der Gesamtdauer der Übungen

abhängig war. Ebenfalls untersucht wurde, ob sich die Muskelaktivierungen der einzelnen Messungen bei Frauen und Männern unterscheiden.

Es zeigte sich, dass die untersuchten Studenten für die Einatemphasen vor den einzelnen Übungen bereits ein etabliertes muskuläres Koordinationsmuster besitzen. In Bezug auf die Atemtypen (Bauch oder Brustatmer) gibt es Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden. So weisen Männer besonders im Bereich der Bänder um Brust und Bauch ausgeprägtere Umfangszunahmen auf, wohingegen Frauen im Bereich der Flanken weitere Dehnungen zeigen. Das heißt, dass Männer verstärkt die Bauchatmung nutzen, während Frauen eher die Brustatmung einsetzen.

Unabhängig vom technischen Anspruch der einzelnen Übungen wurden muskelspezifische Unterschiede bezüglich der Beanspruchungsniveaus nachgewiesen, die von der Dauer und vom technischen Anforderungsniveau der einzelnen Übungen abhängig waren.

Ebenso zeigte sich, dass die weiblichen Probanden über alle Übungen hinweg und für fast alle Muskeln jeweils ein höheres Beanspruchungsniveau aufwiesen. Als Ausnahme davon ist der Musculus sternocleidomastoideus zu nennen, welcher jeweils bei den Männern das höhere Beanspruchungsniveau aufwies.

Für die einzelnen Gesangsübungen wurden jeweils charakteristische Koordinationsmuster der Rumpfmuskulatur nachgewiesen, welche bei allen untersuchten Studenten in einem ähnlichen Maß ausgeprägt waren. So hatte jeder einzelne untersuchte Muskel in den verschiedenen Übungen eine charakteristische Verlaufscharakteristik seiner Aktivität, welche seine Funktion bei unterschiedlichen technischen Herausforderungen widerspiegelte. Es offenbarte sich zum Beispiel jeweils ein deutlich erhöhtes Aktivitätsniveau der tiefen Rückenmuskulatur zu Beginn des Tonansatzes. Diese Aktivitätsmuster sind, den Verlauf der einzelnen Muskelaktivitäten betrachtend, bei allen Studenten ausgeprägt und ohne deutliche interindividuelle Schwankungen nachweisbar. Somit weisen die Studenten schon in ihrem ersten Studienjahr, trotz unterschiedlichen Ausbildungsstandes zum Zeitpunkt des Studienbeginns, ein sich deutlich ähnelndes und gefestigtes Muster der Muskelaktivitätsverläufe in den untersuchten technischen Gesangsübungen auf.

Mit der vorliegenden Arbeit ist eine erste Annäherung an die genauere Beschreibung der beim Singen, insbesondere auch der beim „Stützen“ ablaufenden muskulären Aktivitätscharakteristiken während spezifischer gesangstechnischer Übungen gelungen.

2 Einleitung

"Im selben Augenblick, da die unteren Bereiche des Atmungsorgans (Zwerchfell-Rücken-Flanken-Bauchwand) sich anschicken, den Atem in Bewegung zu setzen, ist auch schon durch einen energisch erfolgten Reflex der Kontakt zwischen Atmungsorgan und Kehlkopf hergestellt."

Husler: Singen - Die physische Natur des Stimmorgans 1965 (Husler und Rodd-Marling 1978)

Dieses Zitat verdeutlicht, wie wichtig die Atmung und die damit verbundenen Muskelbereiche zur Klangerzeugung während des Singens sind. Die Zusammenhänge zwischen Gesang und Atmung sind schon oft beschrieben und auf die unterschiedlichsten Arten interpretiert worden. Doch gestatten die bisher veröffentlichten Untersuchungen keine wissenschaftlichen Kriterien genügende Beurteilung - „Aber wer tiefer einzudringen versucht in das so ungemein komplizierte funktionelle Gebäude des Organs, der wird sich des Eindrucks nicht erwehren können, dass der eigentliche Mechanismus des Singens als ein wissenschaftlicher Gegenstand bis jetzt erst in ganz wagen Umrissen existiert.“ (Husler und Rodd-Marling 1978).

Bezüglich der Frage, wie Atmung und Gesang zusammenhängen, gab es in der Vergangenheit zwei unterschiedliche Standpunkte. Einerseits wurde davon ausgegangen, dass die richtige Atmung eine „Urfunktion“ darstellt, welche ganz von allein zur idealen Tonerzeugung beiträgt (Husler und Rodd-Marling 1978). In diesem Sinne ist auch die Auffassung zu interpretieren, dass der erste Atemzug nach der Geburt mit dem darauf folgenden Schrei bei jedem von Geburt an die richtigen Atmungsstrategien zum Singen oder Klangerzeugen hervorbringt. Diese gehen allerdings über die Zeit verloren und müssen erst beim Neuerlernen dieser natürlichen Atmung durch „[...] Erwecken, [...] Erleben und [...] Kräftigen“ der Atmungsmuskeln während des Studiums wiedererlangt werden (Schlaflhorst und Andersen 1928).

Auf der anderen Seite wurde postuliert, dass die Atmung zur Tonerzeugung formal von der Atmung zwecks Sauerstoffanreicherung des Blutes zu trennen sei und dass das Atmen bei professionellen Sängern als „Kraftleistung, [...] als Form der Athletik“ (Zitat Caruso in (Martienssen-Lohmann 1956)) beschrieben werden sollte. Nach dieser Ansicht ist die reine Ventilationsatmung zur Sauerstoffanreicherung des Blutes von der Phonationsatmung zwecks Klangerzeugung zu trennen. Ein in diesem Zusammenhang

zur Mystifizierung des Begriffs Sängeratmung beitragender Begriff ist die oft genannte „Stütze“. Dieses beim Sänger zu perfektionierende Phänomen ist im Laufe der Jahrhunderte immer wieder diskutiert, von jedem individuell interpretiert und je nach persönlichen, nationalen und sängerischen Prägungen in verschiedenen Formen beschrieben worden (Göpfert 2002, Husler und Rodd-Marling 1978). Jedoch ist klar, dass die Stütze durch das Zusammenspiel von Thorax- Rippen- und Bauchmuskulatur während der Expiration geprägt wird (Sataloff 1988). Wissenschaftlich begründete Erkenntnisse darüber, wie ein Ton gestützt werden soll und welche muskulären Vorgänge dies unterstützen, gibt es bis heute aber noch nicht.

2.1 Grundlagen

Zur Differenzierung zwischen Atmung im Allgemeinen und Sängeratmung im Speziellen wird in der folgenden Arbeit erstere als Ventilationsatmung oder physiologische Atmung und die Zweite als Sängeratmung oder Phonationsatmung bezeichnet.

2.1.1 Atemmechanik der physiologischen Atmung

Die Ventilationsatmung geschieht zum Gasaustausch und ist daher als permanente, lebensnotwendige physiologische Aktivität über das gesamte menschliche Leben zu verzeichnen. Primär dient die Atmung also dazu, den Sauerstoff aus der Umgebungsluft über die Lunge und deren Kontaktflächen letztlich den Gefäßen, dem Blut und dort den Erythrozyten zuzuführen, sowie das im Metabolismus gebildete CO₂ (als flüchtige Säure) abzuatmen (Schmidt et al. 2000, Benninghoff 2003). Um zu verstehen, wie sich die physiologische Ventilationsatmung und die Phonationsatmung voneinander unterscheiden, ist es unerlässlich auf die mechanischen Grundlagen der physiologischen Atmung einzugehen.

In der Atemruhelage befinden sich Lunge und Thorax in einem Zustand, in dem sich die Kräfte der Verkleinerungstendenz der Lunge und der Expansionstendenz des Thorax im Gleichgewicht befinden (Schmidt et al. 2000). Jedoch tritt diese Atemruhelage unter physiologischen Bedingungen in der beschriebenen Form nur kurzzeitig zu Beginn eines Atemzyklus in Ruhe auf. Ein- und Ausatmung basieren auf dem Ausgleich der

Druckdifferenz zwischen Alveolen und Umwelt. Der intrapulmonale Druck muss demnach während der Inspiration niedriger, bei der Expiration höher sein als der Umgebungsdruck. Bei der Inspiration wird dabei aktiv durch muskuläre Arbeit ein Unterdruck im Thorax erzeugt. Durch Hebung des Brustkorbs mithilfe der äußeren Interkostalmuskulatur, der M. scaleni und der Atemhilfsmuskeln (M. sternocleidomastoideus, M. pectoralis major, Mm. Serrati) (Schmidt et al. 2000) sowie durch die Kontraktion und die damit verbundene Abflachung des Zwerchfells kommt es zu einer Vergrößerung des Thoraxraums und einer Zunahme des Lungenvolumens bei gleichzeitiger Ausbildung eines intrathorakalen Unterdruckes. Auch eine Streckung vor allem der Brustwirbelsäule (BWS) trägt zur Erweiterung des Thorax bei. Das ist insofern von Bedeutung, als dass bei sehr tiefer Inspiration durch die Zwerchfellkontraktion ein Zug der unteren Rippen in den Thoraxraum hinein entsteht, was ohne stabilisierende Kräfte eine paradoxe Atmung bedingen würde. Diese stellt ein Phänomen dar, bei dem sich durch mangelnde Stabilisierung der Thorax bei der Einatmung zusammenzieht anstatt sich auszudehnen. Dem aber wirken der M. quadratus lumborum und der M. serratus posterior inferior (Abe et al. 1996, Benninghoff 2003, Valerius et al. 2002) als stabilisierende Muskeln des unteren Thorax entgegen. Je nachdem, ob bei der Inspiration die Brustkorbhebung oder die Zwerchfellkontraktion überwiegen, spricht man von Brust- oder Bauchatmung. Die Kombination von Zwerchfell-/Bauch- und Rippen-/Brustatmung ist die dominante physiologische Form des Atmens. Häufig wird bei der Ruheatmung aber nur die Brust-/Rippenatmung gesehen (Seidner und Wendler 1978). Die auf der schon erwähnten Druckdifferenz zwischen Alveolen und Umwelt basierende Expiration läuft bei ruhiger Atmung weitgehend passiv aufgrund von Retraktionskräften und der auf den Thorax wirkenden Schwerkraft ab. Zu den Retraktionskräften gehört vor allem die Eigenelastizität der Lunge. Auf der anderen Seite wird die bei der Inspiration muskulär erzeugte Verformungsenergie nun als Bewegungsenergie zur Wiedererlangung der Ausgangslage freigesetzt (Benninghoff 2003). Die Expiration kann durch die Bauchmuskulatur und die innere Interkostalmuskulatur aktiv unterstützt werden. Die Bauchmuskeln verdrängen durch ihre Kontraktion und den damit einhergehenden steigenden intraabdominellen Druck (Cresswell et al. 1992) dabei das Zwerchfell nach oben. Die innere Interkostalmuskulatur senkt durch ihre Kontraktion die Rippen.

Um der Bewegung von Thorax und Zwerchfell folgen zu können, dabei aber an beiden nicht vollständig fixiert zu sein, ist die Lunge durch eine Flüssigkeitsschicht im Pleuraspalt von der Thoraxwand getrennt. Die Lunge hat infolge ihrer bereits erwähnten

Eigenelastizität das Bestreben sich zusammenzuziehen. Die Flüssigkeit im Pleuraspalt ist aber nicht dehnbar, wodurch die Lunge an der Thoraxinnenfläche haften bleibt. Dadurch wird einerseits das vollständige Zusammenfallen der Lunge verhindert, andererseits eine reibungslose Ausdehnung bei der Inspiration ermöglicht. Dies wird dann deutlich, wenn Luft in den Pleuraspalt eindringt und sich die Lunge auf ihr minimales Volumen zusammenziehen kann. Der im Pleuraspalt bestehender Druck ist in Atemruhelage gegenüber dem Umgebungsdruck negativ. Während der Inspiration wird dieser negative Wert noch verstärkt. Nur im Zustand forcierter Atmung kann er positive Werte erreichen.

Die Steuerung der physiologischen Atmung erfolgt normalerweise unwillkürlich über das Atemzentrum im Hirnstamm. Die Funktionscharakteristik wie Atemfrequenz und Atemtiefe der unwillkürlichen Atmung wird dabei durch vielfältige Einflüsse geregelt. Dazu gehören zum Beispiel die den Sauerstoff und CO_2 Partialdruck im Blut kontrollierenden Chemorezeptoren. Aber auch die Umgebungstemperatur, der Sympathiko- oder Parasympathikotonus und andere Einflussgrößen haben einen modulierenden Einfluss auf die Steuerung der Atmung. Ein- und Ausatmung werden dabei durch Stimulation und Hemmung von inspiratorischen und expiratorischen Neuronengruppen im Wechsel automatisch gesteuert. Dehnungsrezeptoren der Lunge unterstützen diesen Wechsel über Rückkopplung des jeweiligen Momentanzustandes. Die physiologische Atemfrequenz in Ruhe beträgt 12 bis 16 Atemzügen pro Minute und das Verhältnis zwischen Ein- und Ausatmung liegt bei ca. 1:2. Das normale Atemzugvolumen beträgt in Ruhe ca. 0,5 l und erreicht damit ein Atemminutenvolumen von ca. 7 l. Dieses kann bei körperlicher Anstrengung auf bis zu 120 l/min gesteigert werden (Schmidt et al. 2000). Die physiologische Ventilationsatmung ist in diesem Sinne sowohl unter Ruhebedingungen als auch bei körperlicher Belastung ein vegetativ gesteuerter und damit ein willentlich nur bedingt zu beeinflussender Prozess.

2.1.2 Klangerzeugung und Atmung

Das Singen erfordert beim Einatmen und Ausatmen Modifikationen des Luftstroms, um eine optimale Klangerzeugung zu gewährleisten. Dabei ist von Bedeutung, dass der durch das Ausatmen generierte Luftstrom während der Tonerzeugung drei Kompartimente passiert, in welchen er so geleitet und umgeformt werden kann, dass er zur Klanggebung beim Singen optimal zur Wirkung kommt.

Als erstes Kompartiment fungiert die Lunge, in welcher die eingeatmete Luft als Kompressor verdichtet und dem nächsten Kompartiment, dem Kehlkopf zugeführt wird. Der dadurch erzeugte Druck des ausgeatmeten Luftstromes wirkt unter der geschlossenen Glottis als subglottischer Druck. Durch ihn werden die Stimmlippen periodisch gesprengt und durch elastische Rückstellkräfte wieder geschlossen (Bernoulli-Effekt) (Kasper 2008). Somit wirken Kehlkopf und Stimmlippen als zweites Kompartiment im Sinne eines Oszillators und Erzeugers des Primärschalls (Sundberg 1997). Dabei ist der durch die Luftsäule erzeugte subglottische Druck eine der wesentlichen Determinanten zur Regulation der Intensität des erzeugten Primärschalls (Biesalski und Frank 1994, Wendler et al. 1996, Friedrich et al. 2008, Sundberg et al. 1999). Als drittes Kompartiment dient das „Ansatzrohr“ - der Artikulationsraum bzw. Resonanzraum mit Rachen, Mund und Nasenhöhlen. Dieses „Ansatzrohr“ ist mit seinen verformbaren Dimensionen der Resonator zur Klangmodulation des erzeugten Tones (Sundberg et al. 2007). Ziel des Gesangsstudiums ist es, alle drei anatomischen Kompartimente zu schulen und im Sinne einer optimalen klanglichen Tonerzeugung auszubilden.

Im dritten Kompartiment bei der Klangmodulation geht es also vor allem auch darum, die Artikulation und Konfiguration der Formanten zu optimieren. Diese sind für den Klang einer Stimme von besonderer Bedeutung. Als Formanten werden in der Phonetik die Frequenzanteile der Stimme bezeichnet, die im Resonanzraum im Vergleich zu anderen Anteilen besonders verstärkt werden. Eine Formantenanalyse erlaubt die individuelle Beurteilung der Funktionalität des Ansatzrohres, indem mit spezieller Software die Ausprägung der einzelnen Formanten der Gesangsstimme analysiert wird. Diese individuelle Analyse ermöglicht es, die durch die gesangstechnische Schulung kontrollierte räumliche Anpassung des Ansatzrohres zu überprüfen und somit die Optimierung des Klanges in Bezug auf die Ausprägung und die Frequenz der Formanten zu erreichen.

Die Funktion eines Teils des zweiten Kompartimentes, der Stimmlippen, wird über das Masse-Spannungsverhältnis definiert und kann vor allem anhand der Regulation von Tonhöhe, Lautstärke und Registerausgleich (Wechsel zwischen Kopf- und Bruststimme) beurteilt werden. Die Analyse der Funktion des Kompressors, also der Lunge, ist hingegen weit schwieriger. Ziel der sängerischen Ausbildung ist es, mittels des Kompressors einen gleichmäßigen Luftstrom zu erzeugen.

Schon oft wurden sowohl „betrachtende“ als auch „tastende“ Untersuchungen durchgeführt, um „von außen zu ergründen“ wie die Dosierung des Luftstromes vor sich

geht (Forchhammer 1937, Seidner und Wendler 1978). Jedoch sind solche Beobachtungen nicht dazu geeignet herauszufinden, wie Atmung und Klangerzeugung im Kehlkopf zusammenhängen (Seidner und Wendler 1978).

Eine Möglichkeit der Objektivierung stellt die Analyse des subglottischen Druckes dar, da dieser Aufschluss über den zur Tongenerierung genutzten Luftstrom geben kann (Titze 1989, Sundberg et al. 1999, Sjolander und Sundberg 2004). Damit ist aber noch nicht geklärt, wie dieser zu einer möglichst adäquaten Luftstromerzeugung genutzt wird.

Als Hilfsmittel zur Generierung des Luftstroms wird die schon erwähnte Stütze eingesetzt, welche dazu dienen soll, den Atem dosiert „entweichen“ (Husler und Rodd-Marling 1978) zu lassen. Ziel des Stützvorganges ist die bewusste und zweckmäßige Führung des Ausatemstromes, um eine optimale Funktion des Kehlkopfes zur Klangerzeugung gewährleisten zu können (Seidner und Wendler 1978, Sundberg 1997). Im Weiteren wird die Stütze mit der Fähigkeit gleichgesetzt, den generierten Luftstrom gleichmäßig durch die Glottis strömen und gerade so viel Luft entweichen zu lassen, wie zur optimalen Tongebung nötig ist.

2.2 Atmung und Gesang

Im Folgenden werden die Besonderheiten der Phonationsatmung dargestellt. Wie oben erläutert, ist in Ruhe vor allem die Rippen-/Brustatmung dominant (Seidner und Wendler 1978). Diese ist, im Gegensatz zur Zwerchfell-/Bauchatmung, aber nur in der Lage ca. 1/3 des Atemvolumens zu fördern. Aufgrund des größeren mit der Zwerchfellatmung bewegten Luftvolumens erschließt sich, warum für Sänger eine kombinierte und somit wieder physiologischere costo-abdominale Atmung, also ein gemischter Atemtyp zwischen Rippen- und Zwerchfellatmung empfohlen wird (Husler und Rodd-Marling 1978, Seidner und Wendler 1978, Sundberg 1997, Biesalski und Frank 1994). Es wird die Ansichten vertreten, dass es kein ideales Verhältnis zwischen diesen beiden gebe, vielmehr sei dieses Verhältnis individuell unterschiedlich (Klingholz 2000) und könne je nach Anforderungen in seinen Anteilen willkürlich dosiert werden (Seidner und Wendler 1978).

Durch die kombinierte Brust- und Bauchatmung ist es einerseits möglich, den Thorax durch die Kontraktion des Zwerchfells in seiner unteren Apertur zu vergrößern und andererseits durch das Anheben der Rippen den Thorax in seiner oberen Apertur zu

dehnen. Damit kann bei dosiertem Einsatz von Brust und Bauchatmung ein den Erfordernissen der zu singenden Passagen entsprechendes Atemvolumen zur Verfügung gestellt und ein optimaler subglottischer Druck erzeugt werden. Gleichzeitig soll der Kehlkopf mit seinen Muskeln durch die Weitung des unteren Thorax locker und unverkrampft bleiben (Husler und Rodd-Marling 1978).

Von vielen Seiten ist anerkannt, dass eine forcierte zu hohe Einatmung, auch Schlüsselbeinatmung genannt, und eine damit einhergehende unphysiologische Anspannen von Hals-, Schulter- und Nackenmuskulatur, also der Einsatz der Atemhilfsmuskeln, zu vermeiden ist (Schlaffhorst und Andersen 1928, Seidner und Wendler 1978, Husler und Rodd-Marling 1978, Mathelitsch und Friedrich 1995).

Um ein größeres Luftvolumen für den expiratorischen Luftstrom zur Verfügung zu stellen, wird im Gegensatz zur alltäglichen unbewussten Nasenatmung beim Singen oftmals eine willkürlichere Mundatmung eingesetzt. Diese ermöglicht es, einerseits schneller einzuatmen und andererseits größere Atemzugvolumina für lange Gesangspassagen zur Verfügung zu stellen (Biesalski und Frank 1994).

Somit unterscheidet sich die sängerische Inspiration in vielen Punkten von der Mechanik der physiologischen Inspiration. Sie geschieht schneller und bewegt meist größere Luftvolumina als dies beim physiologischen Atmen der Fall ist (Binazzi et al. 2006). Zusätzlich sind Sänger in der Lage, den Moment der Inspiration nach dem passenden Zeitpunkt in der Phrasierung einer Gesangspassage auszurichten. Oftmals wird der unwillkürliche Reiz zur Inspiration, ausgelöst durch das Atemzentrum, übergangen und diese willentlich hinausgezögert oder vorweggenommen. Somit überlagert die Phonationsatmung die reflektorisch gesteuerte physiologische Atmung und ist in Grenzen willentlich in ihrem Typ, ihrer Frequenz und ihrem Volumen beeinflussbar. Auch wenn in vielen Lehrbüchern der Prozess des sängerischen Einatmens als völlig natürlicher Vorgang beschrieben ist und deshalb während des Singens nicht nachgedacht werden soll (Husler und Rodd-Marling 1978), so wird doch aus den Unterschieden zur physiologischen Ventilationsatmung deutlich, dass dieses Einatmen willkürlich gesteuert werden muss, um es optimal den Anforderungen des Singens anzupassen.

Wie im Kapitel Klangerzeugung (2.1.2) beschrieben, ist für die eigentliche Tonerzeugung die Ausatmung von entscheidender Bedeutung, da diese erst die eingeatmete Luft in einen Luftstrom umformt, der dosiert entlassen wird und dabei die Stimmlippen zum Schwingen und Klingen bringt. Deshalb sind die Unterschiede

zwischen physiologischer und sängerischer Ausatmung in diesem Bereich noch ausgeprägter als dies für die Einatmung der Fall war.

Existiert bei der physiologischen Atmung, wie schon geschrieben ein Zeitverhältnis von 1:2 zwischen Ein- und Ausatmung so kann dies beim Singen willkürlich bis auf 1:50 gesteigert werden (Biesalski und Frank 1994). Die Ausatmung dauert beim Singen also wesentlich länger als üblich (Binazzi et al. 2006). Die passive durch die Rückstellkräfte der gedehnten Lunge und des verformten Thorax hervorgerufene physiologische Ausatmung wäre in ihrer Dauer auch viel zu kurz, als dass sie beim Singen zum Erzeugen von langen Tonfolgen genutzt werden könnte. Deshalb müssen vom Sänger Fähigkeiten entwickelt werden, welche die Ausatmung verlängern, indem diese willkürlich und aktiv gesteuert wird, damit das Ausströmen der Luft langsam und dosiert erfolgen kann (Seidner und Wendler 1978).

2.3 Atmung und Stütze

Der Prozess des Stützens ist vor allem durch die subjektiven Empfindungen eines Sängers geprägt, da eine genaue Definition schwierig ist (Seidner und Wendler 1978). Den unterschiedlichen Beschreibungen ist aber gemeinsam, dass durch den Aufbau einer Gegenspannung zum Zwerchfell ein zu schnelles Entweichen der Luft verhindert werden soll (Leanderson et al. 1987, Griffin et al. 1995). Unterschiedliches findet man zum Aufbau der Gegenspannung. Mal ist es der Rücken, mal der Bauch und mal die Einatemmuskulatur selbst, die diese Gegenspannung zu den passiven Rückstellkräften des Thorax erzeugen soll. Mal wird die Stütze als Zurückhalten der Luft mittels der Einatemmuskulatur, mal als Verdichten der Luft unterhalb der Glottis beschrieben (Forchhammer 1937), oder auch als „Aufrichtung des Gesangsorgans, als Vorgang der vom untersten Ende der Bauchmuskulatur und der Gesäßmuskulatur sich bis über den Gaumen aufwärts erstreckt“ (Husler und Rodd-Marling 1978). Selbst bei Untersuchungen aus jüngerer Zeit erhält man auf die Frage, was denn die Stütze für den einzelnen bedeutet, die unterschiedlichsten Antworten (Sand und Sundberg 2005, Griffin et al. 1995). Einigkeit besteht nur insofern, dass ein Zusammenspiel zwischen Atemmuskulatur, Haltung, erzeugtem subglottischen Druck, Larynxkontrolle und individuellem Empfinden für die Stütze beim Ausatmen bedeutsam ist (White 1988, Sonninen et al. 2005). „Stütze ist der Halt, der dem Zusammenfallen des Ausatemapparates elastisch entgegenwirkt und den subglottischen Druck auf den

optimalen Betriebsdruck reduziert“ (Winckel 1952). Daher wird im Folgenden die Stütze als Fähigkeit zur kontrollierten Abgabe der eingeatmeten Luft angesehen.

In der heutigen Zeit, in der die wissenschaftlichen Möglichkeiten besser und die Anforderungen an professionelle Sänger höher geworden sind, tritt die Frage nach der funktionellen Grundlage der Stütze wieder stärker in den Mittelpunkt. Mit der genaueren Untersuchung des Phänomens Stütze können Möglichkeiten eröffnet werden, um im Gesangsstudium die technische Ausbildung der professionellen Sängerstimme nicht nur hinsichtlich der Charakterisierung der Formanten zu optimieren. Auch eine wissenschaftlich begründete energetische Optimierung der Sängeratmung und somit auch der Stütze zur Schonung und Perfektionierung der professionellen Sängerstimme erscheint möglich, wenn Gesangspädagogen, Phoniater, Physiologen und Mediziner zusammenarbeiten (Emmons 1988). Nach Ansicht vieler Sänger und Gesangspädagogen ist der Gesangsberuf mittlerweile ein Berufsfeld geworden, welches in Teilbereichen mit dem Leistungssport gleichzusetzen ist. Daher sind eine gesunde Stütztechnik und der effiziente Gebrauch der dazu nötigen Kompartimente eine entscheidende Voraussetzung für ein problemloses und gesundheitlich stabiles langes Berufsleben.

Ein besseres Verständnis dieser Vorgänge ist daher unerlässlich, um dem Sänger in seiner Ausbildung und weiteren Berufsbahn ein Hilfsmittel zur Optimierung seiner Technik zur Verfügung zu stellen.

2.4 Bisherige Erkenntnisse

Die meisten bisherigen Untersuchungen bezüglich der sängerischen Atmung und der Stützfunktion während des Singens beschäftigten sich mit den Zusammenhängen zwischen den unterschiedlichen Atemtypen (Rippen- oder Zwerchfellatmung) und den dabei generierten subglottischen Drücken, welche dann zur Tonerzeugung genutzt werden. Dabei wurde festgestellt, dass klassisch geschulte Sänger stabile Atemmuster besitzen, diese aber interindividuell stark variieren (Collyer et al. 2008, Collyer et al. 2009a). Es wurde untersucht, ob sich eine gezielte Veränderung der Wichtung von Brust- oder Bauchatmung auf die klangliche Qualität des Tones auswirken (Collyer et al. 2009a) und ob diese Veränderung in den Atemmustern durch den Hörer differenziert werden können (Collyer et al. 2009b). Diese Untersuchungen konnten keine eindeutigen Korrelationen zwischen Atemtyp, Klangqualität und deren Perzeption

feststellen. Eine ähnliche Untersuchung fand heraus, dass es einerseits geschulte Hörer gibt, die eine ungestützte von einer gestützten Stimme unterscheiden konnten, dass aber andererseits selbst Sänger ihre eigene gestützte Stimme nicht von der eigenen ungestützten unterscheiden können (Sonninen et al. 2005).

Neben Atemmustermessungen wurden auch die subglottischen Drücke, Lungenvolumina und Luftflussparameter über die Glottis aufgezeichnet und diese dann mit Stimmanalysen in Beziehung gesetzt, die jedoch keine einheitlichen Befunde erbrachten (Iwarsson et al. 1998, Titze 1989, Akerlund und Gramming 1994, Sundberg et al. 1999).

Da gesangspädagogische Übungen schon lange darauf zielen, die Positionierung des Larynx in der Art zu beeinflussen, dass die in ihm verankerten Stimmlippen elastisch bleiben und damit optimal zur Klangerzeugung genutzt werden können (Elliot et al. 1997), beschäftigten sich einige Studien mit der durch differenzierte Atmung zu verändernden Larynxposition, um herauszufinden, was zur angestrebten Lockerheit innerhalb dieses Organs und zur guten Tongebung beiträgt. Nach diesen Untersuchungen (Iwarsson 2001, Iwarsson und Sundberg 1998, Shipp 1975) hängt die vertikale Position des Larynx sowohl von der Tonhöhe (Andersen und Sonninen 1960), vom Lungenvolumen als auch von der Art der Einatmung ab. Je größer das Lungenvolumen (Iwarsson et al. 1998) desto tiefer tritt der Larynx. Wahrscheinlich geschieht dies auch aufgrund des Zuges der Trachea, welche bei tiefer Inspiration mit der Dehnung der Lunge nach unten gezogen wird. Damit kann vielleicht auch das Phänomen erklärt werden, dass der Larynx ebenso in seiner Position sank, wenn eine vermehrte Bauchatmung durchgeführt wurde (Iwarsson 2001). In engem Zusammenhang zu diesen Untersuchungen stehen Ergebnisse, die zeigen, dass auch die Aktivierung des Diaphragmas über das dadurch veränderte Lungenvolumen Einfluss auf die Positionierung des Larynx und damit die Klangproduktion hat (Leanderson et al. 1987, Sundberg et al. 1989). Unabhängig davon stand der Larynx umso höher, je höher der gesungene Ton war (Shipp 1975).

Andere Untersuchungen betrachteten spezifische kleinere Muskelgruppen und deren Aktivitäten während des Singens. So sind von Pettersen umfassende und detaillierte Untersuchungen der Hals- und Nackenmuskeln sowie von Teilen der Atem- und Bauchmuskulatur durchgeführt worden (Pettersen und Westgaard 2005, Pettersen und Westgaard 2004a, Pettersen und Westgaard 2004b, Pettersen und Westgaard 2002, Pettersen et al. 2005). Diese kamen zu dem Ergebnis, dass vor allem der M. sternocleidomastoideus beim sängerischen Atmen häufig als unterstützender Muskel

der Inspiration genutzt wird. Seine Aktivität ließ sich durch Biofeedback senken, was aber subjektiv keinen Einfluss die Klangqualität des Singens der Probanden hatte (Pettersen und Westgaard 2002). Dies lässt vermuten, dass er in einem energetisch unnötig hohen Maße beansprucht wird.

Für den M. trapezius descendens fand Pettersen, dass dieser Muskel vor allem mit der Interkostalmuskulatur und den Mm. obliqui während der Phonation korrelierend aktiv ist, woraus der Autor schloss, dass der M. trapezius descendens beim Singen wie die Mm. obliqui expiratorisch wirkt (Pettersen und Westgaard 2004a). Auch für ihn ließ sich eine Aktivitätsabnahme durch Biofeedback erreichen, doch änderte sich dadurch auch das Aktivitätsmuster (Pettersen und Westgaard 2002). Der steile Aktivitätsanstieg gegen Ende der zu singenden Übungen schwächte sich ab oder blieb sogar aus (Pettersen und Westgaard 2004b). Die mittels Biofeedback gesenkte Aktivität führte zu einer Erweiterung des Volumens im Thoraxbereich.

Des Weiteren untersuchte Pettersen (Pettersen 2005) die Aktivitäten der Mm. scaleni, welche korrelierend zu den Aktivitäten des M. sternocleidomastoideus, wie in 2.1.1 erläutert, als inspiratorische Muskeln wirken. Auch ihre Aktivität ließ sich durch Biofeedback senken. Die ebenfalls betrachteten Muskeln im dorsalen Halsbereich waren sowohl während der Inspiration als auch während der Phonation aktiv. Dies deutete er als unnötige muskuläre Anspannung, da sie einerseits keine physiologische Funktion besitzen, welche die Atmung unterstützt und weil sich andererseits ihre Aktivität im Biofeedback zusammen mit der des M. trapezius descendens senken ließ.

Die Aktivität der durch Pettersen (Pettersen und Westgaard 2004a) untersuchten Bauchmuskeln ließ sich durch Biofeedback hingegen nicht senken. Doch fand er gerade für diese Muskelgruppe heraus, dass professionelle Opernsänger diese im Vergleich zu Gesangsstudenten auf höherem Aktivitätsniveau benutzen und das insbesondere zur Generierung von Tönen hoher Intensität (Pettersen und Westgaard 2004a). Watson (Watson et al. 1989) konnte zeigen, dass vor allem die lateralen Bauchmuskeln beim Singen beteiligt sind und von diesen wiederum mehr die unteren Anteile.

Ebenfalls von Pettersen gibt es eine erste Untersuchung zum M. pectoralis major (Pettersen 2006). Er konnte feststellen, dass der Muskel bei weiblichen Probanden besonders am Ende der Einatmung und noch am Beginn der Phonation aktiv ist, während die männlichen Probanden diesen Muskel über die gesamte Phonation aktivieren.

Der M. latissimus dorsi ist von Watson (Watson et al. 2011) beim Singen untersucht worden. Dabei wurde festgestellt, dass er nicht nur bei der unerwünschten Schlüsselbeinatmung aktiv ist, sondern auch dazu beiträgt, den Thorax während des Singens und damit der Expiration weit zu halten.

Erste Integrationsversuche der Ergebnisse von Muskelaktivität und subglottischem Druck wurden von Sundberg durchgeführt (Sundberg et al. 1991). Er fand heraus, dass die Aktivität des Diaphragmas, der Bauch- und Interkostalmuskulatur einerseits von der Positionierung des Körpers abhängt (aufrecht stehend oder liegend) und das andererseits trotz dieser unterschiedlichen Beanspruchungen der erzeugte subglottische Druck weitgehend konstant gehalten wurde.

In allen den zuletzt vorgestellten Studien wurde das Oberflächen Elektromyogramm (OEMG) als Untersuchungsmethode genutzt. Daraus wird ersichtlich, dass das OEMG eine geeignete Methode darstellt, um die muskulären Aktivitätsmuster während des Singens und der sängerischen Atmung zu untersuchen, um herauszufinden, welche Muskeln dazu beitragen, die passive Kraft der Expiration durch aktive Kraftwirkung zu modulieren, um den Luftstrom der Expiration dosiert entweichen zu lassen. Diese wissenschaftlichen Untersuchungen können dazu beitragen, Beschreibungen wie „aus dem unteren Rücken heraus“, „...das spannungsvolle Weithalten in Brustkorb und Taille in die Tonproduktion mit hinüber zu nehmen“ (Göpfert 2002) oder „Zurückhalten der Luft mittels Einatemmuskulatur“ (Forchhammer 1937) zu objektivieren und genauer zu definieren, wie die Stütze als Basis für die kontrollierte Ausatmung funktioniert.

2.5 EMG

Die Elektromyographie (EMG) stellt eine etablierte Untersuchungsmethode dar, bei der man mit applizierten Elektroden die myoelektrischen Signale der einzelnen Muskeln registriert, diese darstellt und zur quantitativen Charakterisierung der Muskelaktivität nutzt. Damit ist ein „Blick in den Muskel“ (Basmajian und De Luca 1985) möglich.

Die Grundlage dieser gemessenen elektrischen Signale sind die über den Muskel wandernden Aktionspotentiale. Diese entstehen durch Veränderungen im Ionenungleichgewicht an den Membranen der einzelnen Muskelfasern. An ihrem Ursprungsort, der motorischen Endplatte, werden diese Aktionspotentiale durch veränderte Permeabilitätszustände der Ionenkanäle ausgelöst. Diese

Permeabilitätsänderungen wiederum werden durch an den Rezeptoren der alpha-Motoneurone wirkende Transmitter hervorgerufen. Durch den damit an den Muskelfasermembranen ausgelösten Depolarisations-Repolarisations-Zyklus entsteht ein elektrischer Dipol, welcher entlang der Muskelfasern wandert und durch die applizierten Elektroden registriert werden kann. (De Luca 1979, Basmajian und De Luca 1985, Schmidt et al. 2000)

Es können verschiedene Möglichkeiten der Elektrodenapplikation angewandt werden, die sich sowohl hinsichtlich der Praktikabilität der Applikation, der Toleranz durch die Probanden und in der Genauigkeit der gemessenen Aktivitäten unterscheiden. Als einfachstes und am besten toleriertes Verfahren hat sich die Ableitung der Muskelströme mithilfe von Oberflächen Elektroden etabliert. Dabei werden an der Hautoberfläche Elektroden so positioniert, dass sie das Interferenzmuster der Aktionspotentiale aller darunter liegenden aktiven motorischen Einheiten erfassen. Das so aufgezeichnete Oberflächen-EMG (OEMG) bietet vor allem den Vorteil der einfachen Durchführbarkeit. Von Vorteil ist ebenfalls, dass die für diese Methode bereits etablierte Soft- bzw. Hardware gestattet, die Aktivität einer Vielzahl von Muskeln gleichzeitig abzuleiten. Das Verfahren hat damit eine breite Anwendbarkeit sowohl für klinische als auch für experimentelle Fragestellungen (De Luca und Knaflitz 1992).

Das daneben existierende Verfahren des Nadel-EMG bietet theoretisch den Vorteil der genaueren Platzierung der Elektroden im zu untersuchenden Muskel. Diesem Vorteil steht allerdings die in Wiederholungsuntersuchungen nachgewiesene schlechtere Reproduzierbarkeit im Vergleich zu OEMG-Untersuchungen entgegen (Takehara et al. 2004). Außerdem ist dieses Verfahren für die Probanden sehr unangenehm, wird somit oft schlecht toleriert und ist daher für Multiableitungen kaum geeignet, so dass diese Ableitmethode gezielten neurologischen Fragestellungen vorbehalten bleibt.

Aufgrund des Abstandes zwischen generiertem Potential in der Tiefe des Gewebes und detektierender Elektrodenfläche an der Hautoberfläche unterliegt das OEMG allerdings einer Anzahl ungünstiger Beeinflussungen. Dazu gehört die Beschaffenheit und Dicke des Unterhautfettgewebes (Farina et al. 2002, Farina et al. 2004b), welches als natürlicher Tiefpassfilter fungiert und besonders bei beleibteren Personen dazu beiträgt, das Signal abzuschwächen. Auch der Hautwiderstand, welcher in gleicher Weise wirkt, beeinflusst die OEMG-Signale. Nicht zuletzt sind, aufgrund der Verschiebbarkeit von Haut und Muskulatur, Bewegungsartefakte eine weitere zu beachtende Störgröße bei der Aufzeichnung des OEMGs. Mit einem optimalen Versuchsaufbau ist es aber möglich, Störgrößen auf ein Minimum zu reduzieren (Merletti et al. 2001, Farina et al.

2002). (siehe auch 3.2.1). Der wesentlichste, die Reliabilität aller EMG-Messungen am meisten beeinflussende Faktor ist jedoch der Untersucher selbst, sowohl im Rahmen der Elektrodenapplikation als auch im Rahmen der Auswertung und Interpretation, wobei der zweite Aspekt insbesondere für das Nadel-EMG entscheidende Bedeutung hat.

Bei der bipolaren OEMG Ableitung werden zwei Elektroden in konstantem Abstand hintereinander parallel zur Faserrichtung des zu untersuchenden Muskels über dessen Muskelbauch platziert. Je nach Größe des Interelektrodenabstands werden die Aktionspotentiale unterschiedlich tief liegender Muskeln abgeleitet (De Luca 1979). Als optimaler Abstand wird in mehreren Publikationen (De Luca und Knaflitz 1992, Farina et al. 2002, Basmajian und De Luca 1985) ein Interelektrodenabstand von 1-2cm favorisiert. Je kleiner dieser Abstand ist, desto weniger ist es möglich, tief liegende Muskeln in ihrer Aktivität zu untersuchen (De Luca und Knaflitz 1992). Da bei tiefer liegenden Muskeln die möglichen Störgrößen mehr Gewicht bekommen, ist für deren Untersuchung die Verwendung von fine wire oder Nadelelektroden zu empfehlen, welche gestatten, die Elektrode direkt im tief liegenden Muskel zu platzieren. Die korrekte Positionierung der Oberflächenelektroden ist für eine intra- und individuelle Vergleichbarkeit unerlässlich. Dafür orientiert man sich an allgemein festgelegten Orientierungspunkten und Platzierungsvorschriften (Hermens et al. 1999), welche in vielen elektromyografischen Untersuchungen genutzt wurden. Solche Platzierungspunkte befinden sich im Allgemeinen zentral über dem Muskelbauch des betreffenden Muskels (Beck et al. 2009). Je weiter dieser Punkt vom Rand eines Muskels entfernt ist, desto geringer ist der durch benachbarte Muskeln einstreuende cross talk (de Luca 1997, Farina et al. 2002, Farina et al. 2004a).

Das von korrekt platzierten Elektroden registrierte Rohsignal ist durch positive und negative Ausschläge charakterisiert. Zur besseren Interpretation und Beschreibung ist es nötig, dieses gleichzurichten und von Spitzenpotentialen zu bereinigen. Die Bildung des Root mean square (rms) ist als eine der gebräuchlichsten Glättungsmethoden international etabliert (De Luca 1979). Rms bedeutet das Ziehen der Wurzel aus dem vorher quadrierten Eingangssignal. Mit dem so gewonnen geglätteten und gleichgerichteten Signal ist eine weitere Verarbeitung der Daten möglich.

Da das EMG-Signal eine stochastische Größe darstellt, ist es nötig, dieses Signal über mehrere Wiederholungen der interessierenden Bewegungsabläufe zu mitteln, um gerade bei dynamischen Fragestellungen eine interindividuelle Vergleichbarkeit der

gemessenen Aktivitäten zu gewährleisten. Im Allgemeinen sind 10 Wiederholungen pro Übung empfohlen (Shiavi et al. 1987).

Aufgrund der individuell unterschiedlichen anatomischen Beschaffenheit des Unterhautgewebes der Probanden ist eine Normierung der gemessenen Daten (Yang und Winter 1984) zum Ausgleich der auf diesen Unterschieden basierenden variierenden Höhen der gemessenen Aktivitäten unerlässlich. Bei der Untersuchung von einzelnen Muskeln welche isoliert kontrahiert werden können (z.B. M. biceps brachii), wird als Goldstandard die Normierung auf die so genannte maximal voluntary contraction (MVC), also die maximale willentliche Kontraktion eines einzelnen Muskels verwendet (Burden und Bartlett 1999). Als optimales Verfahren bei Untersuchungen von mehreren Muskeln und insbesondere von Muskeln, welche schlecht isoliert kontrahiert werden können, hat sich jedoch die Normierung auf ein übungsspezifisches Aktivitätsmaximum der untersuchten Muskeln herauskristallisiert (Yang und Winter 1984, Mathiassen et al. 1995, Marras und Davis 2001).

2.6 Betrachtete Muskeln

In der vorliegenden Arbeit wird vor allem der Zusammenhang zwischen sängerischer Atmung und der Aktivität der Rumpfmuskulatur analysiert, so dass die eigentlichen Muskeln der Tonerzeugung, also die Muskeln des Kehlkopfes nicht in die Betrachtungen einbezogen werden. Ergebnisse, die die Zusammenhänge zwischen Tonerzeugung im Kehlkopf und der Klanggebung beschreiben, sind z.B. bei Faaborg-Andersen (Faaborg-Andersen und Buchthal 1956, Andersen und Sonninen 1960, Faaborg-Andersen und Vennard 1964), Hirano (Hirano et al. 1967, Hirano et al. 1969, Hirano et al. 1970, Hirano 1988), Redenbaugh (Redenbaugh und Reich 1989) und Shipp (Shipp und Izdebski 1975) zu finden, werden in der vorliegenden Arbeit aber nicht erläutert.

Für eine übersichtliche Darstellung der Vielzahl der untersuchten Rumpfmuskeln werden diese zu funktionellen Gruppen zusammengefasst und immer gemeinsam in ihren Ergebnissen dargestellt und diskutiert. Diese Gruppen werden im Folgenden vorgestellt, ihre funktionell anatomische Wirkungsweise beschrieben und Hypothesen darüber aufgestellt, inwieweit sie den Vorgang des Singens beeinflussen könnten.

Die anatomischen und funktionell anatomischen Erläuterungen im folgenden Abschnitt sind dem Lehrbuch für Anatomie Band 1 von Benninghoff (Benninghoff 2003) und dem „Muskelbuch“ von Valerius (Valerius et al. 2002) entnommen.

2.6.1 Atemmuskulatur

Wie unter 2.1.1 beschrieben, ist die Atemmuskulatur beim Singen besonders bedeutsam.

Zwerchfell / Diaphragma (DP)

Das Diaphragma ist ein flächiger den Thorax quer durchspannender Muskel, welcher im entspannten Zustand kuppelförmig den Bauchraum vom Thorax trennt. Bei seiner Kontraktion während der Einatmung flacht er sich ab und erweitert dadurch das Volumen des Thorax und engt den Bauchraum ein. Unterstützt wird seine Funktion durch den M. serratus posterior und den M. quadratus lumborum, welche die untere Thoraxapertur stabilisieren und so einer paradoxen Atmung entgegenwirken (siehe 2.1.1.) Während der Entspannung tritt das Diaphragma wieder nach oben und unterstützt damit den durch Retraktionskräfte hervorgerufenen passiven Vorgang der physiologischen Expiration. Wie unter 1.1.1. beschrieben, ist das Diaphragma im Gegensatz zu vielen anderen Muskeln nur eingeschränkt willkürlich steuerbar und somit der willentlichen Ansteuerung weitgehend entzogen. Beim Singen ist es sowohl für die Einatmung (Pettersen und Eggebo 2009, Leanderson et al. 1987) als auch während der Phonation (Bouhuys et al. 1966, Leanderson et al. 1987) und der damit verbundenen verlängerten Ausatmung von Bedeutung, weil es beim Einatmen zur Volumenvergrößerung im Thorax beiträgt und eine Gegenkraft zu den Rückstellkräften der Lunge erzeugt (Seidner und Wendler 1978, Sundberg 1997, Göpfert 2002)

Mm. Intercostales (ICO5 und ICO8)

Repräsentativ für die Interkostalmuskeln werden die des fünften und achten Interkostalraumes untersucht. Anatomisch unterteilen sie sich in die Mm. intercostales externi und die Mm. intercostales interni. Erstere verlaufen schräg von hinten oben nach vorn unten zwischen den Tubercula costarum und dem Beginn der Rippenknorpel, letztere verlaufen senkrecht zu diesen vom Brustbein bis zum Rippenwinkel. Funktionell unterstützen die externen Interkostalmuskeln die Einatmung durch Hebung der

ventralen Rippen, während die internen die Ausatmung durch die Senkung derselben unterstützen (Taylor 1960, Mead et al. 1968, Newsom und Sears 1970, Campbell 1968). Durch die Hebung der oberen Rippen vergrößert sich der Thorax in der Sagittalebene. Untersuchungen der parasternalen Interkostalmuskeln ergaben, dass diese parallel zur Inspiration an Aktivität zunahmen, was bis in den Beginn der Expiration persistierte (De Troyer und Estenne 1984). Für das Singen wurde beschrieben, dass die Interkostalmuskulatur als willentlich steuerbare Inspirationsmuskulatur der während der Phonation eintretenden Volumenminderung durch eine Weithaltung des Thorax entgegenwirken kann (Seidner und Wendler 1978, Mathelitsch und Friedrich 1995). Für die Phonation wird ihnen auch eine Funktion bei der Feinregulation des subglottischen Drucks unterstellt (Sears 1977).

Bei der Messung ihrer Aktivität durch das OEMG ist es aufgrund ihrer direkt aufeinander liegenden Positionierung schwierig zu unterscheiden, ob die gemessene Aktivität von den externen oder internen Interkostalmuskeln generiert wird. Sie werden daher im Komplex betrachtet.

2.6.2 Bauchmuskulatur

Für alle Bauchmuskeln ist anerkannt, dass diese als wichtige Muskelgruppe für die Stütze betrachtet werden. (Leanderson und Sundberg 1988). Jedoch tun sie dies je nach Muskel in unterschiedlicher Ausprägung.

Als Vertreter der vier großen Bauchmuskeln (M. rectus abdominis, M. transversus abdominis, M. obliquus internus und M. obliquus externus) wurden die drei untersucht, welche durch die Messung mittels OEMG gut erreichbar waren. Der M. transversus abdominis, welcher die größte Bedeutung bei der Ausatmung zu besitzen scheint, (Goldman et al. 1987, De Troyer et al. 1990, Abe et al. 1996, Ainscough-Potts et al. 2006), konnte aufgrund seiner tiefen Lage mit der benutzten Methode nicht direkt untersucht werden (Carpenter et al. 2008). Die Aktivität des M. obliquus internus kann aber in der applizierten Elektrodenposition weitgehend mit der des Transversus abdominis gleich gesetzt werden (Marshall und Murphy 2003).

M. obliquus internus (OI)

Der M. obliquus internus erstreckt sich von einer langen Ursprungslinie, welche von der Fascia thoracolumbalis über die Crista iliaca bis über die Mitte des Leistenbandes reicht, fächerförmig bis zu den unteren drei Rippen und der Rektusscheide. Er ist

physiologisch sowohl zur Beugung als auch zur Rotation des Rumpfes, ebenso wie zur Erzeugung der Bauchpresse von Bedeutung. Für die Atmung hat er von allen betrachteten Bauchmuskeln die größte Bedeutung als Unterstützer der Expiration (Goldman et al. 1987, Abe et al. 1996, Ainscough-Potts et al. 2006).

M. obliquus externus (OE)

Er entspringt zackenförmig von der unteren 6. bis 12. Rippe und inseriert teils am Labium externum der Crista iliaca zwischen der Mitte des Darmbeinkammes und der Spina iliaca anterior superior, teils geht er in die Rektusscheide über. Damit ist dieser Muskel ebenso wie Ol ein Rumpfbeuger und Unterstützer der Rotation. Auch er ist an der Erzeugung der Bauchpresse beteiligt. Bei der Expiration ist seine Funktion ähnlich der des Ol, jedoch ist er dabei in geringerem Maße aktiv, bzw. wird dies erst bei forcierter Ausatmung (Abe et al. 1996, Campbell 1952).

M. rectus abdominis (RA)

Dieser gerade Bauchmuskel, welcher sich vom Processus xyphoideus und den Rippenknorpeln der 5. bis 7. Rippe bis zur Symphyse spannt, ist durch festes Bindegewebe sowohl in einen rechten und linken Anteil, als auch auf jeder Seite durch die Intersectiones tendineae in 4 Segmente geteilt. Physiologisch ist er primär für die Beugung des Rumpfes im Bereich der Brustwirbelsäule (BWS) verantwortlich. Bei Fixierung des Thorax kippt er gleichzeitig die Symphyse nach kranial und ist für die Erzeugung der Bauchpresse von Bedeutung. Sein kranialer Anteil ist an der Feinabstimmung der Expiration beim Sprechen beteiligt (Valerius et al. 2002). Es ist aber auch beschrieben, dass er nicht aktiviert wird (Goldman et al. 1987), sofern Konzentration darauf gelenkt wird, den Rumpf beim Ausatmen nicht zu beugen (Campbell 1952). Bei den großen expiratorischen Anstrengungen des Singen und Atmens ist er jedoch bedeutsam (Abe et al. 1996).

Sowohl für RA als auch OE gibt es Ergebnisse, die belegen, dass diese beiden Muskeln auch immer bei einer maximalen Inspiration beteiligt sind (Campbell 1952).

Aufgrund ihrer den unteren Rumpfbereich umspannenden Lage wirken alle Bauchmuskeln zusammen während ihrer Kontraktion als stabilisierende Kraft auf die lumbale Wirbelsäule (Tesh et al. 1987). Somit können sie einem vorzeitigen Zusammensinken des Rumpfes während der Expiration entgegenwirken.

2.6.3 Nacken/Halsmuskulatur

Die beiden hier betrachteten Muskeln sind bezüglich ihrer Funktion für das Singen in jüngster Zeit oft untersucht worden (Pettersen und Westgaard 2002, Pettersen und Westgaard 2004a, Pettersen et al. 2005).

M. sternocleidomastoideus (SCM)

Dieser allgemein als Atemhilfsmuskel angesehene Muskel (Campbell 1955, Raper et al. 1966, Basmajian und De Luca 1985) verläuft zwischen dem Oberrand des Sternums und dem Hinterkopf. Funktionell anatomisch ist er für die Anteflexion im Hals und die Rotation des Kopfes auf die kontralaterale Seite verantwortlich. Er wird aber auch bei forcierter Atmung aktiviert (Campbell 1955, Campbell 1968, Vitti et al. 1973, Costa et al. 1994, Tomich et al. 2007), während er bei Ruheatmung nicht aktiv wird (Raper et al. 1966). Als Atemhilfsmuskel und beim sängerischen Einatmen ist er für das Heben des oberen Brustkorbes und damit für dessen obere Ausdehnung verantwortlich (Raper et al. 1966, Campbell 1968, Basmajian und De Luca 1985). Es gibt aber auch Ergebnisse, die zeigen, dass seine Anspannung ein Zeichen für Ermüdung bei Sängern darstellt (Rubin et al. 2003).

M. trapezius descendens (TD)

Der M. trapezius ist ein großer flächiger Muskel, welcher sich von einer langen Ursprungslinie im Verlauf der Linie vom Processus spinosus bis zur Protuberantia occipitalis externa, bis zum lateralen Drittel der Clavicula und dem Acromion ausdehnt. Seine pars descendens ist einer von drei Teilen dieses großen Muskels und ist für das Heben der Schultern und die Rotation des Schulterblattes von Bedeutung (Basmajian und De Luca 1985). Gleichzeitig hat er Bedeutung bei der Extension der Halswirbelsäule (HWS). Obwohl in einzelnen Studien sowohl Aktivitäten während der Inspiration (Campbell 1968) als auch der Expiration (Pettersen und Westgaard 2004b) gefunden wurden, hat er für die Ruheatmung keine physiologische Funktion, wird aber oft als Muskel bezeichnet, der sowohl körperliche als auch emotionale Anspannung signalisiert (Mathiassen et al. 1995). Deshalb ist es auch ein Ziel der sängerischen Ausbildung, die Schultern immer entspannt zu halten und diesen Muskel so wenig wie möglich zu aktivieren (Emmons 1988).

2.6.4 Thoraxmuskulatur

Diese Muskulatur ist vor allem für die Aufrechterhaltung der Weite im Thorax während der Expiration verantwortlich.

Exemplarisch werden in der vorliegenden Untersuchung zwei Muskeln untersucht, welche durch die Messung mittels OEMG gut erreichbar sind.

M. pectoralis major (PM)

Dieser im Allgemeinen als Brustmuskel bezeichnete Muskel spannt sich von der medialen Hälfte der Clavicula, dem Sternum und von den Pars cartilaginei der oberen Rippen bis zu Crista tuberculi majoris humeri. Er ist anatomisch in die drei Bereiche Pars clavicularis, Pars sternocostalis und Pars abdominalis unterteilt. Funktionell ist er vor allem für die Innenrotation, die Adduktion und die Retroversion des Armes wichtig. Sein oberer Teil, die pars clavicularis, kann bei festgestellten Armen als Atemhilfsmuskel genutzt werden (Valerius et al. 2002).

Für die sängerische Atmung ist beschrieben, dass er bei Frauen als unterstützender Muskel während der Inspiration aktiviert wird, wohingegen er bei den Männern erst am Ende der Phonation aktiv ist (Pettersen 2006).

M. serratus anterior (SA)

Der Musculus serratus anterior entspringt mit einzelnen Zacken von den oberen 8 bis 10 Rippen und setzt an der Margo medialis scapulae an. Mit seinem Verlauf dicht entlang der Brustwand bis unter die Scapula trägt er dazu bei, die Scapula eng am Rumpf zu halten. Gleichzeitig ist er an ihrer Lateralverschiebung und Drehung beteiligt. Er ist aber auch einer der wichtigsten Muskeln für die Elevation des Armes über die Horizontale. Aufgrund seines Ursprungs hebt er auch die Rippen und ist insbesondere bei festgestellten Schulterblättern als Unterstützer der Inspiration anzusehen (Reid et al. 1976). Bei unterschiedlichen physiologischen Atemmanövern ist eine erhöhte Aktivität beobachtet worden (Cerqueira und Garbellini 1999). Ob er eine Bedeutung für die Atmung beim Singen hat, ist noch nicht untersucht.

2.6.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Bei der Erläuterungen der Stütze fallen immer wieder die Begriffe „vom unteren Rücken her“ (Husler und Rodd-Marling 1978). Deshalb erscheint eine Untersuchung dieser Muskeln sinnvoll, um die muskulären Koordinationsmuster der Stütze beim Singen aufzudecken.

M. multifidus (MF)

Dieser kleine gefiederte Muskel, der sich zwischen der Facies dorsalis des Os sacrum und dem Processus mamillares der Lendenwirbelsäule (LWS) zu den Dornfortsätzen der LWS spannt, ist vor allem für die Stabilität im unteren Rücken verantwortlich (Bradl et al. 2005). Funktionell anatomisch trägt er auch zur Neigung nach ipsilateral und zur Rotation nach kontralateral bei.

Ob und welche Bedeutung er beim Singen hat, ist noch nicht untersucht.

M. quadratus lumborum (QL)

Dieser ebenfalls tief liegende Rückenmuskel durchspannt den Raum zwischen der untersten Rippe und der Crista iliaca. Er ist an der Stabilisierung der hinteren Bauchwand und damit auch an der Stabilisierung der unteren Thoraxapertur als Ursprung für das Diaphragma beteiligt und wirkt daher inspiratorisch (Boyd et al. 1965). Seine Funktionen beim Singen sind ebenfalls noch nicht untersucht.

2.6.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Da beim Singen eine gestreckte Wirbelsäule angestrebt (Husler und Rodd-Marling 1978, Seidner und Wendler 1978) wird, ist auch die Untersuchung oberflächlich liegender Muskeln, welche vor allem für die Stabilität der längs gestreckten Wirbelsäule verantwortlich sind, bedeutsam. Für alle drei zu untersuchenden Muskeln ist eine unterstützende Wirkung zur Stabilisierung der Wirbelsäule besonders in der Inspiration nachgewiesen (Cala et al. 1992). Diese Stabilisierung verhindert ein Zusammensinken des Thorax und ein damit verbundenes vorzeitiges Entweichen der Inspirationsluft. Dass die Rückenmuskulatur auch für die Expiration von Bedeutung ist, konnte zum Beispiel durch Cholewicki (Cholewicki et al. 2002) gezeigt werden. Seine

Untersuchungen zeigten eine deutliche Korrelation zwischen der Muskelaktivität stammnaher Muskeln und dem intraabdominellen bzw. dem intrathorakalen Druck.

M. erector spinae pars iliocostalis lumborum (EI)

Wie der Name des Muskels schon sagt, erstreckt sich dieser von der Crista iliaca bis zu den Rippenwinkeln der unteren Rippen. Damit ist seine Kontraktion für die Aufrichtung der Wirbelsäule im Bereich der Lendenwirbelsäule (LWS) verantwortlich. Gleichzeitig senkt er dadurch die unteren Rippen. Er füllt als mächtiger Muskel fast die gesamte Lendenlordose und ist auch an der Kippung des Beckens nach ventral beteiligt. Dies ist in einigen Gesangsschulen (Fischer 1969, Riesch 1972, Husler und Rodd-Marling 1978) als erwünschter Effekt beim Stützen beschrieben. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass er auch zur Neigung nach ipsilateral und zur Rotation nach kontralateral beiträgt. Seine Bedeutung für das Singen ist mittels OEMG noch nicht untersucht.

M. erector spinae pars longissimus (EL)

Dieser Muskel ist mit seinem Faserverlauf vom Kreuzbein bis zu den Processus mamillares, accessorius bzw. transversus der Lenden- bzw. Brustwirbelsäule sowohl für die Aufrichtung als auch die Seitneigung der Wirbelsäule verantwortlich. Im Unterschied zu EI rotiert er nach ipsilateral. Während der forcierten physiologischen Atmung wurde für diesen Muskel eine erhöhte Aktivität beobachtet (Shirley et al. 2003). Auch für ihn liegen keine OEMG-Befunde beim Singen vor.

M. latissimus dorsi (LD)

Als ein großflächiger und kräftiger Rückenmuskel, welcher sich von den Dornfortsätzen der Wirbelkörpern sowohl der Lendenwirbelsäule (LWS) als auch der Brustwirbelsäule (BWS) und dem Oberrand der Crista iliaca zur Crista tuberculi minoris des Armes erstreckt, ist er vor allem für die Innenrotation, die Adduktion und die Retroversion des Armes verantwortlich. Zugleich ist er aber auch ein Hilfsmuskel, welcher bei festgestellten Armen für die tiefe Inspiration und die forcierte Expiration genutzt werden kann. Bei Patienten mit chronischen Lungenerkrankungen ist er daher verdickt und wird oft als Hustenmuskel bezeichnet. Watson untersuchte schon seine Bedeutung beim Singen (Watson et al. 2011) und fand eine funktionelle Bedeutung bei der während des Singens auftretenden forcierten Atmung.

2.7 Fragestellungen der Arbeit

Wegen der unzureichenden Befunde zu muskulären Abläufen während des Singens soll ein Kooperationsprojekt zwischen der AG Biomechanik der Klinik für Hand-, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums der Friedrich Schiller Universität Jena und des Studios für Stimmforschung der Musikhochschule Carl Maria von Weber Dresden junge Gesangsstudenten im Verlauf ihres Studiums begleiten, um genau diese Abläufe zu analysieren und in ihrer Entwicklung über das Gesangsstudium zu verfolgen, damit Schlussfolgerungen für eine Optimierung der Gesangsausbildung abgeleitet werden können.

Die vorliegende Arbeit versucht, mit den OEMG-Daten der Eingangsuntersuchung zu Beginn des Gesangsstudiums erste Erkenntnisse zu erlangen.

Folgende Hypothesen werden aufgestellt und überprüft:

1. Männliche und weibliche Probanden zeigen starke Unterschiede in ihren muskulären Koordinationsmustern und die Frauen zeigen aufgrund einer muskulären Überlegenheit der Männer grundsätzlich höhere muskuläre Beanspruchungsniveaus.
2. Gesangsstudenten sind zum Beginn ihrer Ausbildung noch nicht in der Lage konstante muskuläre Koordinationsmuster der untersuchten Muskulatur zu präsentieren.
3. Im Verlauf der Untersuchung tritt über die Übungen hinweg eine kontinuierliche muskuläre Ermüdung ein, welche sich in einer Zunahme des Beanspruchungsniveaus der einzelnen Muskeln im zeitlichen Verlauf äußert.
Alternativhypothese: Es ist keine kontinuierliche Zunahme des Beanspruchungsniveaus im Sinne einer Ermüdung im Verlauf der Untersuchung zu sehen. Die Höhe des Beanspruchungsniveaus ist abhängig von der zeitlichen Dauer der einzelnen Übungen.
4. Die muskulären Koordinationsmuster zeigen sowohl bei der Einatmung als auch bei der Phonation starke interindividuelle Unterschiede.

3 Material und Methoden

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen sind Teil eines Kooperationsprojektes der Hochschule für Musik Carl Maria von Weber in Dresden mit der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Fachbereich Motorik, Biomechanik und Pathophysiologie an der Friedrich Schiller Universität Jena. Dieses Projekt wurde von der Ethikkommission der Friedrich Schiller Universität Jena befürwortet (Bearbeitungs-Nr. 2320-06/08) und wird durch das Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Freistaates Sachsen mit Fördermitteln unterstützt. (Förderkennzeichen: 4-7531.50-03-2800-08/1). Angelegt als Langzeitstudie begleitet es Gesangstudenten während ihrer kompletten Ausbildung an einer Musikhochschule.

Mit dieser Langzeitstudie sollen Fragen beantwortet werden, die sich mit dem Zusammenhang zwischen muskulärer Koordination, Atmung und Qualität der Stimme in Wechselwirkung mit der professionellen Gesangsausbildung auseinandersetzen. Die Beurteilung der Stimmqualität erfolgt durch eine spezielle Software des Instituts für Stimmphysiologie der Hochschule für Musik in Dresden, die während der durchgeführten Messungen simultan den Gesang der Studenten aufzeichnet und analysiert. Die Ergebnisse dieser Analysen sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ziel der durchgeführten Untersuchungen ist es, die Gesangsstudenten am Beginn ihres Studiums dahingehend zu beurteilen, ob und in welcher Ausprägung es zu diesem Zeitpunkt bereits feste muskuläre Koordinationsmuster gibt. Diese Koordinationsmuster sollen insbesondere für die das Singen vorbereitenden Einatemphasen und bei standardisierten Gesangsübungen betrachtet werden. Bei späteren jährlichen Nachmessungen soll dann beobachtet werden, ob sich die Koordinationsmuster im Verlauf des Studiums verändern und inwieweit sie sich den Koordinationsmustern von zu einem späteren Zeitpunkt zu untersuchenden Profisängern anpassen oder sich von diesen unterscheiden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich ausschließlich mit den Betrachtungen der Eingangsuntersuchung zu Beginn des Projekts.

Für diese Untersuchung wurde bei den Gesangsstudenten während des mehrmaligen Vortragens von vier verschiedenen technischen Gesangsübungen mittels Oberflächen-EMG (OEMG) die Muskelaktivität ausgewählter Muskeln des Thorax, des Bauches und des Rückens erfasst, sowie die Thoraxexkursionen im Brust-, Flanken- und Bauchbereich mithilfe von elastischen, dehnungssensiblen Bändern registriert. Die

Gesangsübungen werden am Institut für Stimmforschung der Hochschule für Musik in Dresden bereits über Jahre für die standardisierte und vergleichbare Verlaufskontrolle der Stimmqualität der Gesangsstudenten eingesetzt. Sie können somit als etabliert betrachtet werden.

3.1 Probanden

Es wurden 24 Gesangsstudenten im ersten Studienjahr ihres Gesangsstudiums untersucht. Da zu Beginn des Projekts mit nur 9 Studenten im ersten Studienjahr an der Hochschule für Musik in Dresden nicht genügend Probanden zur Verfügung standen, wurden 12 Studenten der Hochschule für Musik und Theater Felix Mendelssohn Bartholdy in Leipzig und 3 Studenten der Hochschule für Musik Franz Liszt in Weimar in die Untersuchungen mit einbezogen. Von diesen 24 Studenten im Alter von 19 bis 26 Jahren (Median=20) waren jeweils 12 männlichen und 12 weiblichen Geschlechts. Die Körpergröße der Probanden variierte zwischen 156 cm und 193 cm (weibliche Probanden 156 cm bis 174 cm, männliche Probanden 172 cm bis 193 cm) und das Gewicht zwischen minimal 58 kg (weibliche 58 kg, männliche 64 kg) und maximal 90 kg (weibliche 81 kg, männliche 90 kg). Daraus berechnet zeigte sich eine Spannweite des BMI (Body-Mass-Index) von 18,4 bis 28,4. Bei den weiblichen Probanden zeigten sich dabei BMI Werte zwischen 19,2 und 29,2, bei den männlichen zwischen 20,1 und 25,7 (Tabelle 2). Alle Studenten brachten unterschiedliche Vorerfahrungen im Fach Sologesang mit. Diese reichten von einer jahrelangen Mitgliedschaft in einem Knabenchor (ohne spezielle Schulung der Stimme für den Sologesang) bis zur langjährigen gezielten Vorbereitung auf die Aufnahmeprüfung im Fach Gesang (Tabelle 1).

Ein männlicher Proband (P02) war aufgrund seiner Körpermasse und einer zu starken Schweißproduktion für die Messungen ungeeignet und wurde daher in die Auswertungen nicht mit einbezogen. Seine Daten wurden auch in Tabelle 2 nicht berücksichtigt.

Tabelle 1 Probandendaten 1

Dargestellt sind für alle untersuchten Probanden deren Geschlecht, Stimmlage, Alter, Zeitpunkt des Studienbeginns und Anzahl der Jahre mit Erfahrungen im Sologesang oder Chor
(Die Probandennummer P10-P17 wurden für eine parallele gleichartige Untersuchung an Blasinstrument-Studenten vergeben)

Probanden-nummer	Geschlecht	Stimmlage	Alter [J]	Studienbeginn	Solounterricht [Jahre]	Chor-Erfahrung [Jahre]
P01	m	Bassbariton	25	01.10.2008	8,5	
P03	w	Sopran	20	01.10.2008	5	
P04	w	Sopran	19	01.10.2008	4,5	
P05	w	Mezzosopran	20	01.10.2008	6,5	
P06	m	Bassbariton	19	01.10.2008	5	
P07	w	Sopran	19	01.10.2008	11	
P08	m	Bariton	25	01.10.2008	4,5	
P09	w	Mezzosopran	23	01.10.2008	8	
P18	w	Sopran	19	01.10.2008	?	
P19	w	Sopran	20	01.10.2008	4	
P20	m	Tenor	22	01.10.2008	2	
P21	w	Sopran	20	01.10.2008	6	
P22	w	Sopran	20	01.10.2008	3	
P23	m	Bariton	20	01.10.2008	0	12
P24	w	Mezzosopran	25	01.10.2008	4	
P25	w	Sopran	19	01.10.2008	2	
P26	m	Bassbariton	20	01.10.2008	1	9
P27	m	Bassbariton	19	01.10.2008	0	8
P28	m	Bassbariton	20	01.10.2008	3	
P29	w	Sopran	19	01.10.2008	8	
P30	w	Mezzosopran	19	01.10.2008	4	
P31	m	Tenor	26	01.10.2008	2	
P32	m	Bariton	21	01.10.2008	3	12

Tabelle 2 Probandendaten 2

Dargestellt sind für männliche, weibliche und die Gesamtheit der Probanden die erhobenen Daten bezüglich Gewicht und Größe und der daraus berechnete BMI

	Größe in cm			Gewicht in kg			BMI		
	männlich	weiblich	gesamt	männlich	weiblich	gesamt	männlich	weiblich	gesamt
Median	184	169	174	76	63	70	22,6	23,1	22,8
Minimum	172	156	156	64	58	58	20,1	19,2	18,4
Maximum	193	174	193	90	81	90	25,7	29,2	28,4

3.2 Untersuchung

3.2.1 Untersuchungsaufbau

Um die für die OEMG-Messungen benötigten Elektroden auf der Haut korrekt positionieren zu können, wurden die Markierungen für die Platzierung der Oberflächenelektroden immer durch den gleichen und erfahrenen Untersucher mithilfe eines wasserfesten Hautstiftes (Regular Tip #160, Devon[®] Skin Marker, TYCO Healthcare GmbH, Deutschland) gesetzt. An den so markierten Stellen wurde zuerst durch Rasur eine eventuell vorhandene Körperbehaarung entfernt und anschließend die Haut mit einer Peelingcreme (Epicont, General Electrics Healthcare, Deutschland) vorbehandelt, um die Impedanz zwischen Elektrode und Haut zu minimieren und damit die Streuspannung zu vermindern (Gans und Gorniak 1980). Nach diesen vorbereitenden Maßnahmen wurden an den Markierungspunkten, welche sich nach Hermens (Hermens et al. 1999), Ng (Ng et al. 1998), Falla (Falla et al. 2002), de Foa (De Foa et al. 1989), Jensen (Jensen et al. 1993) und anatomischen Landmarken richteten (siehe Tabelle 3), jeweils zwei Ag/AgCl Oberflächenelektroden (H93SG, Arbo[®], TYCO Healthcare GmbH, Deutschland) parallel zur Faserrichtung des zu untersuchenden Muskels (Farina et al. 2002) angebracht. Durch die Verwendung dieser beschichteten Elektroden war es möglich, eine zusätzliche Herabsetzung der Impedanz zu erreichen. Der Interelektrodenabstand betrug 2,5 cm. Wie schon in Kapitel 2.5 beschrieben, ist so eine optimale Erfassung von Muskelaktivitäten der oberflächlich liegenden Muskeln möglich. Es wurden 15 Muskeln sowohl der Atem-, Bauch-, und Thorax- als auch der tiefen und oberflächlichen Rückenmuskulatur symmetrisch von beiden Körperhälften abgeleitet (Tabelle 3).

Die Auswahl der Muskeln richtete sich nach der zu untersuchenden Fragestellung. In der vorliegenden Untersuchung wurden im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen, (Pettersen und Westgaard 2004a, Pettersen et al. 2005, Pettersen 2006, Watson et al. 2011), welche immer nur einzelne oder wenige Muskeln einbezogen, erstmals mehrere große Muskelgruppen gleichzeitig untersucht. Im Einzelnen waren dies Teile der eigentlichen Atemmuskulatur wie das Diaphragma und die Mm. Intercostales (exemplarisch die der Interkostalräume 5 und 8), die ebenfalls am Atemvorgang mit beteiligte Bauchmuskulatur (M. obliquus internus, M. obliquus

externus, M. rectus anterior) (Abe et al. 1996), Teile der Halsmuskulatur (M. sternocleidomastoideus) und der Thoraxmuskulatur (M. pectoralis major, M. serratus anterior) sowie Teile der Atemhilfsmuskulatur (M. sternocleidomastoideus, M. pectoralis major). Aufgrund seiner schlechten Ableitbarkeit durch Oberflächenelektroden, wurde der M. transversus abdominis nicht mit berücksichtigt, aber durch die Ableitung des M. obliquus internus teilweise miterfasst (McGill et al. 1996). Auch Teile des an der Stabilität des Rumpfes während der Atmung beteiligten Musculus erector spinae wurden in die Untersuchung einbezogen. Dies betraf im speziellen die Mm. iliocostales und den M. longissimus. Die tiefer liegende Rückenmuskulatur in Form des M. multifidus und des M. quadratus lumborum wurden für Fragen bezüglich der Rumpfstabilität (Cholewicki et al. 2002) während der Untersuchungen ebenso betrachtet wie der M. trapezius pars descendens als Vertreter der Schultermuskulatur, dessen unter Umständen erhöhte Aktivität als ein Zeichen für psychische Anspannung besonders auch bei Musikern angesehen werden kann (Yoshie et al. 2009).

Tabelle 3 Elektroden und Bandpositionen

Dargestellt sind in der linken Spalte die untersuchten Muskeln und deren Abkürzungsbezeichnung, das EKG und die drei Atembänder sowie in der rechten Spalte die Positionierungen der Elektroden/Bänder

Muskel	Lokalisation
Diaphragma (DP)	7.-8. ICR, Medioclavicularlinie, senkrecht
Intercostale (5.ICR) (ICO5)	5. ICR, vordere Achsillarlinie (Höhe Xiphoid)
Intercostale (8.ICR) (ICO8)	8. ICR, vordere Achsillarlinie
Obliquus internus (OI)	medial Inguinalfalte, Höhe SIAS, horizontal
Obliquus externus (OE)	Ca. 30° nach unten, Hälfte Distanz Rippenbogen – Beckenkamm, seidl. Körperkontur
Rectus abdominis (RA)	kaudale Elektrode Höhe Nabel, 4cm von Mitte, vertikal
Sternocleidomastoideus (SCM)	nach kranial, beginnend ca. 2cm oberhalb Clavicula, entlang Muskelkontur
Trapezius descendens (TD)	prox. Elektrode ½ Distanz zw. C7 und Acromion, auf Linie
Pectoralis major (PM)	Hälfte Abst. Achselfalte-Sternum, waagerecht
Serratus anterior (SA)	Höhe Xiphoid, seidl. Körperkontur, 45°nach dorsal ansteigend, auf Linie
Multifidus (MF)	Höhe L5, 1cm medial der Linie SIPS – L1/L2 Zwischenraum
Quadratus lumborum (QL)	Neben Muskelbauch Multifidus, Hälfte zwischen 12.Rippe und Crista iliaca, vertikal
Erector (iliocostalis) (EI)	Höhe L2, medial d. Linie SIPS-Unterkante Rippenbogen
Erector (longissimus) (EL)	Höhe L1 2Finger lateral des Proc. spinosus auf Muskelbauch, nach kranial
Latissimus dorsi (LD)	½ Distanz Linie hintere Achselfalte L1, auf Linie
EKG	Obere Kante Sternum gegen Herzspitze
Band 1	Höhe direkt unter Achsel
Band 2	Hälfte Distanz zwischen Band 1 und Band 3
Band 3	oberhalb des Beckenkammes

Zusätzlich zu den links und rechts der Körperachse gesetzten Oberflächenelektroden der Rumpfmuskulatur wurden noch zwei Elektroden im Verlauf der Herzachse platziert, um simultan zur Muskelaktivität ein EKG-Signal aufzeichnen zu können (Tabelle 3). Die durch das EKG-bedingten Einstreuungen konnten dadurch in der Auswertung später besser von den registrierten Muskelaktivitäten getrennt und eliminiert werden. Die insgesamt 32 Oberflächenelektrodenpaare wurden anschließend mit den Verstärkern verbunden und an das Aufzeichnungsgerät angeschlossen.

Weiterhin wurden drei elastische Bänder zur Detektion der Thorax-, Flanken- und Bauchexkursionen angelegt (Tabelle 3). Die Registrierung der Auslenkungen erfolgte

dabei über in die Bänder integrierte Kraftaufnehmer, die über die entsprechende Verstärkertechnik ebenfalls mit dem Messsystem verbunden wurden. Auf diese unkonventionelle Methodik wurde deshalb zurückgegriffen, weil kommerziell verfügbare Atembänder aufgrund ihrer Bauweise nicht für die teilweise extrem langsamen Thoraxbewegungen beim Singen geeignet sind. Beim Anlegen der Bänder wurde darauf geachtet, dass die bereits angeschlossenen OEMG-Verstärker nicht durch Zug belastet wurden, um Artefakte zu vermeiden. Die Positionierung der Bänder unter den Achseln, oberhalb des Beckenkammes und in der Mitte zwischen den beiden ersten ist ebenso wie die Positionierung der OEMG- und EKG-Elektroden auf Abbildung 1 dargestellt.

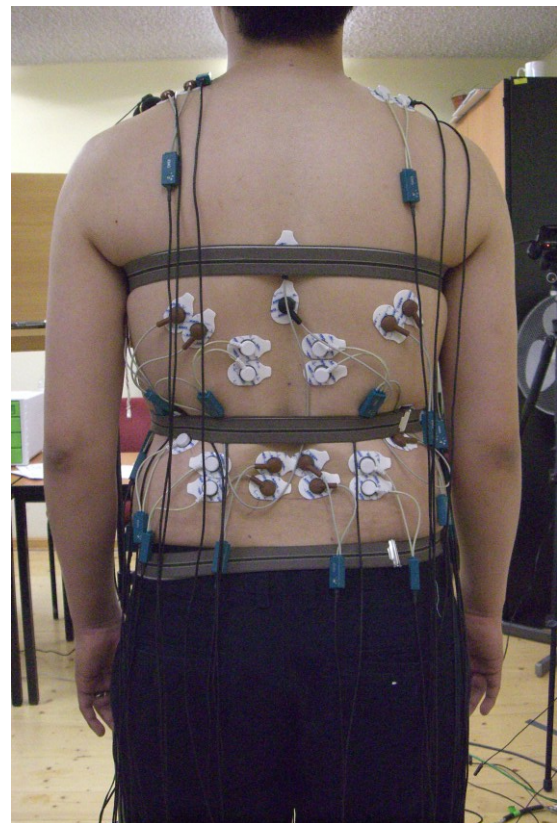
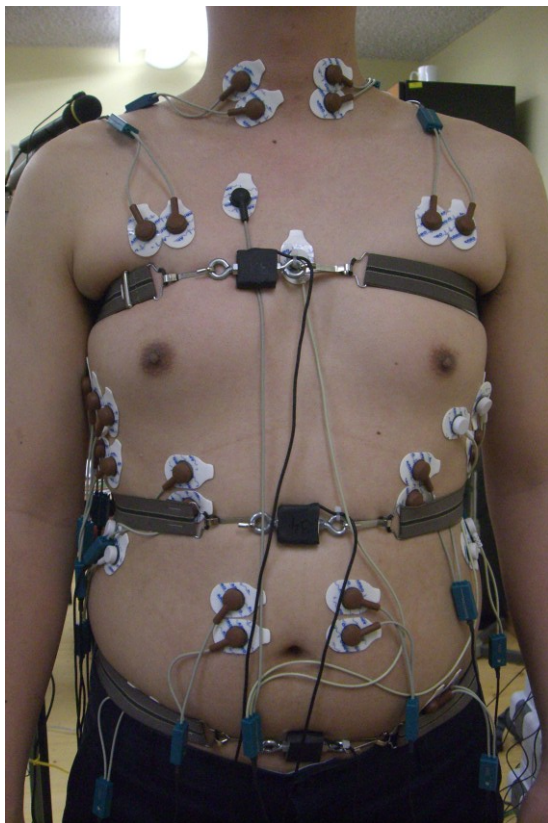


Abbildung 1 Untersuchungsaufbau

Auf den beiden Fotos sind jeweils in der Ansicht von vorn und hinten die Positionierung der Elektroden mit den verbundenen Verstärkern und die Position der dehnbaren Bänder sichtbar

Die so vorbereiteten Studenten wurden anschließend vor einem Mikrophon positioniert. Mit Hilfe eines eigens für diese Untersuchung hergestellten Signalverstärkers und Taktgebers (Spezialanfertigung, Studio für Stimmforschung Dresden, Prof. em. Dr.-Ing. Gert Hofman, Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden) war es möglich, neben den Aktivitäten der OEMGs, dem EKG-Signal und den registrierten Bandauslenkungen in einem weiteren Kanal des

Registriergerätes simultan eine Tonspur aufzuzeichnen. Der vollständige Untersuchungsaufbau wurde jedes Mal vor Beginn der Messungen mithilfe der Aufzeichnungssoftware auf Störsignale überprüft. Gegebenenfalls auftretende Störungen wurden beseitigt.

An diese Instrumentierung schloss sich der eigentliche Untersuchungsablauf an.

3.2.2 Untersuchungsablauf

Zunächst wurde eine 20sekündige Messung in entspannter aufrecht stehender Körperhaltung mit locker herabhängenden Armen vor Beginn der eigentlichen Untersuchung durchgeführt. An diese Ruhemessung schloss sich die Kalibrierung der dehnbaren Bänder an. Durch jeweils eine maximale In- und Expiration in den Thorax-, Flanken-, und Bauchbereich wurden damit für jeden Probanden und jedes Band einzeln die individuellen Endbereiche der Bandauslenkungen definiert.

Da es nicht möglich war, simultan zur Kalibrierung der Bänder die Muskelaktivität zu normieren, wurde anschließend eine Referenzmessung zur Detektion der individuellen maximalen Muskelaktivität jedes einzelnen Muskels (Referenzmaximum) durchgeführt. Wie schon in der Einleitung erörtert, wurde dazu von der unter anderem gebräuchlichen Methode der MVC abgewichen und eine übungsspezifische Situation mit Maximalbeanspruchung der betrachteten Muskeln gewählt. Dafür wurde von den Probanden jeweils dreimal nacheinander (getrennt für Thorax- und Bauchbereich) maximal inspiriert und expiriert. Dabei wurden, wie im weiteren Verlauf generell, simultan sowohl die Muskelaktivität als auch die nun schon kalibrierten Bandauslenkungen aufgezeichnet. Die Berechnung der maximalen Muskelaktivität erfolgte bei Auswertung der Messungen durch Mittelung der maximalen Aktivität aller drei Wiederholungen getrennt für jeden Muskel. In welcher Situation, also ob in einer In- oder Expiration, dieser Maximalwert generiert wurde, ist im Nachgang der Auswertung nicht mehr erkennbar.

Diesen vorbereitenden Untersuchungen schloss sich die eigentliche Messung während der vier Gesangsübungen an. Diese gliederten sich in einen Vokalausgleich, einen Dur-Dreiklang, eine im Staccato gesungene Dur-Tonleiter und einen Schwellton.

Der Vokalausgleich bedeutet das Singen der Vokale A-E-I-O-U auf ein und derselben Tonhöhe, wobei jeder der Töne jeweils etwa eine Sekunde gehalten wurde.



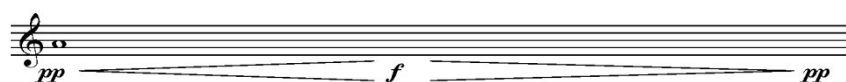
Der Dur-Dreiklang (Grundton, Terz und Quinte einer Tonleiter) wurde sowohl auf- als auch abwärts gesungen. Die Quinte wurde dabei für fünf Sekunden gehalten.



Die im Staccato gesungene Dur-Tonleiter, also eine Tonleiter mit tonlosen Zeitabschnitten zwischen den Noten, wurde vom Grundton aus aufwärts bis zur None (also einen Ton höher als die Oktave) und wieder abwärts bis zum ca. 3 Sekunden gehaltenen Grundton gesungen.



Als letzte Gesangsübung wurde von jedem Probanden ein Schwellton gesungen. Dieser stellt einen Ton dar, welcher so lang wie möglich gehalten werden soll. Während dessen wird ausgehend vom Piano maximal crescendiert und dann erneut bis zum Piano decrescendiert.



Alle diese Übungen wurden von den Studenten auf einer der jeweiligen Stimmlage angepassten Tonhöhe fünfmal nacheinander vorgetragen. Die Körperhaltung wurde dabei daraufhin kontrolliert, die entspannte aufrechte Position beizubehalten. Die Arme sollten zur Vermeidung bewegungsbedingter Artefakte locker herab hängen. Die Einhaltung dieser Position wurde überprüft und ggf. korrigiert.

Welche Übungen für die Untersuchung zu singen sein sollten, war allen Studenten zum Zeitpunkt dieser ersten Untersuchung unbekannt - somit kann ein eventueller Trainingseffekt zu diesem Zeitpunkt ausgeschlossen werden. Die Übungen wurden den Studenten jeweils direkt vor der betreffenden Messung einmal erläutert und dargeboten, anschließend dann von ihnen nachgesungen.

Nach Beendigung aller Gesangsübungen wurde eine erneute Ruhemessung von 20 Sekunden durchgeführt.

3.3 Datenaufzeichnung

Das elektrische Signal der Muskelaktionspotentiale wurde, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, bipolar über den Elektroden abgeleitet. Durch die elektrodennahen Verstärker (5 Hz bis 700 Hz RC-Filter 1. Ordnung Biovision, Deutschland) wurde es um den Faktor 1000 verstärkt. Auf dem weiteren Kabelweg ist das so verstärkte Signal praktisch störunanfällig (De Luca und Knaflitz 1992, de Luca 1997). Die durch das Spezialmikrophon aufgenommenen Tonsignale wurden als Tonspur mitgeführt, welche die Intensität des gesungenen Tones wiedergab. Zur besseren Auffindbarkeit der interessierenden OEMG-Bereiche bzw. Bandauslenkungen konnte diese Tonspur im späteren Verlauf der Auswertung gut genutzt werden. Die Signale der Muskelelektroden, des EKG, der Bandauslenkungen und der Tonspur wurden simultan aufgezeichnet. So wurden parallel 35 Kanäle registriert. Die verstärkten Signale wurden mit einer AD Wandlungsrate von 2000/s digitalisiert (ToM, DeMeTec, Deutschland, Auflösung: 24 bit, automatische Anti-alias-Filterung der Signale bei der Hälfte der Abtastrate) (de Luca 2001) und dem Mess-Laptop zugeführt.

Zusätzlich wurden alle Messungen mittels Videoaufzeichnung (JVC Everio GZHD7 3CCD) archiviert.

3.4 Datenverarbeitung

3.4.1 Vorverarbeitung der Daten

Vorbereitend wurden mittels eigens in der AG Motorik entwickelter MATLAB-Programme (R2008a, The Mathworks Inc., USA, Programmierung: Dr. Ch. Anders) in der mitgeführten Spur der bipolar abgeleiteten Herzaktivität halbautomatisch die oberen Umkehrpunkte der R-Zacken des QRS-Komplexes markiert.

Für die oben erwähnte Berechnung der Referenzwerte der einzelnen Muskeln wurden in WATISA (Eigenentwicklung der FSU Jena) optisch die Bereiche der maximalen

Aktivität identifiziert und mit einem Bereichsmarker gekennzeichnet. Die bezüglich der Fragestellungen interessierenden Bereiche wurden ebenfalls in WATISA identifiziert und mit Markierungen versehen. Schon während der Messungen gesetzte Markierungspunkte konnten nun ebenso wie die parallel aufgezeichnete Tonspur zur Orientierung genutzt werden.

In jeder Übung wurden so die Einatemphase, der gesamte Übungsverlauf und die unten näher bezeichneten individuell interessierenden Bereiche markiert. Für die Einatemphase geschah dies in der Art, dass die erste registrierte Auslenkung eines der drei Bänder als Anfangspunkt und der Beginn des ersten Tones in der Tonspur als Endpunkt gesetzt wurde. Der jeweilige Übungsverlauf wurde durch den Beginn des ersten Tones und das Ende des letzten Tones eingegrenzt. Diese beiden Markierungsschritte wurden für alle Übungen und deren fünf Wiederholungen in gleicher Art und Weise durchgeführt.

Die für jede Übung individuell interessierenden Bereiche wurden anhand von vorher festgelegten Orientierungspunkten aufgesucht und markiert.

Für den Vokalausgleich betraf dies die Bereiche der fünf Vokale. Jeder Vokalbereich wurde einzeln mit einer Markierung versehen (Abbildung 2). Hier dienten zur Orientierung vor allem die bei jedem Vokalwechsel während der Messung gesetzten Marker. Zusätzlich konnte der Vokalwechsel aber auch über die Tonspur identifiziert werden.

Beim Dreiklang wurden mithilfe der gesetzten Orientierungspunkte drei getrennte Bereiche identifiziert: vom Grundton bis zur Quinte, der Bereich der gehaltenen Quinte an sich und der Abgesang wieder hinab zum Grundton.

Als einziger Bereich während der Staccato-Tonleiter wurde der gehaltene Endton markiert.

Wiederum drei Bereichsmarkierungen wurden beim Schwellton gesetzt. Diese drei Bereiche von jeweils 2s Dauer wurden am Anfang, am Ende und zum Zeitpunkt der maximalen Intensität des Tones gewählt. Zur Orientierung diente hier vor allem die mitgeführte Tonspur.

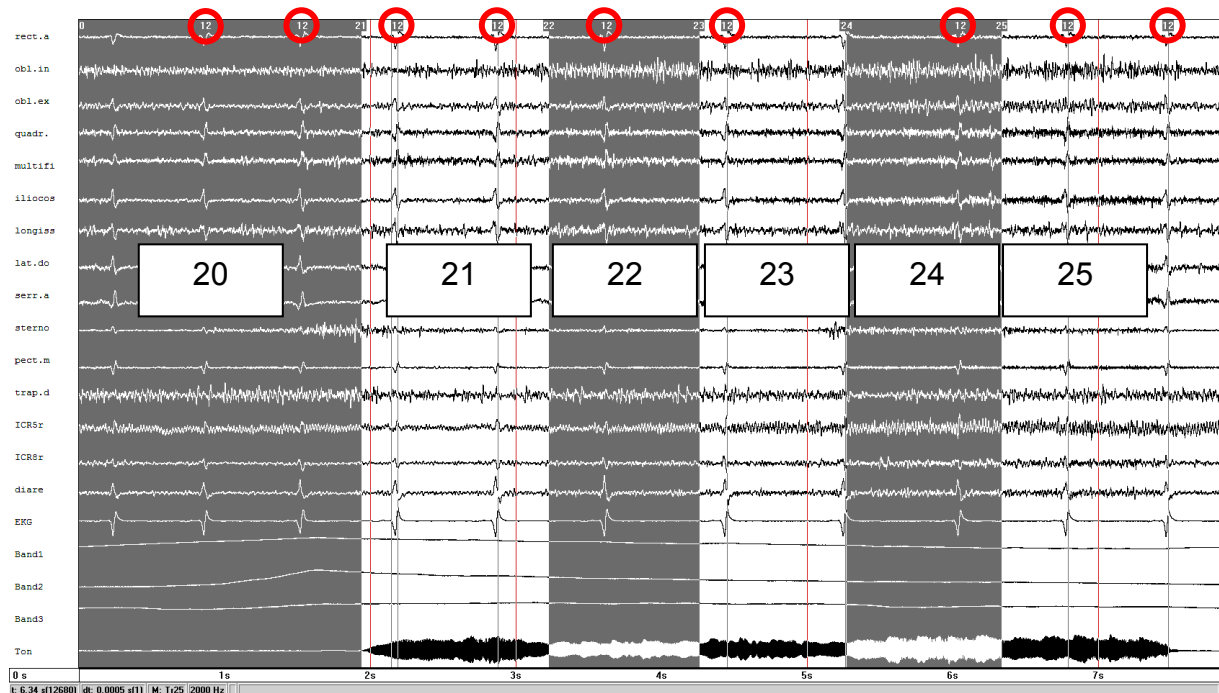


Abbildung 2 Screenshot aus Watisa für den Vokalausgleich am Beispiel der rechten Muskeln
 zu sehen sind für einen Probanden die aufgezeichneten Kanäle untereinander
 15 Muskeln rechts, EKG, 3 Atembänder, Tonintensität und die Markierungspunkte am Oberrand
 In wechselnder Grau-Weiß-Färbung: 20 Einatemphase und 21-25 die Vokale A-E-I-O-U
 12 (roter Kreis) Moment der QRS Komplexe

Alle weiteren Verarbeitungsschritte wurden wieder durch speziell erstellte Programme innerhalb der Matlab-Umgebung (Programmierung: Dr. Ch. Anders) durchgeführt. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Datenverarbeitungsschritte systematisch erläutert.

3.4.2 Allgemeine Datenverarbeitungen

Zunächst wurden alle Daten einer allgemeinen Prozedur zur Artefaktelimination unterworfen. Diese gliederte sich in mehrere Schritte.

Zuerst wurde eine Elimination des Gleichspannungsanteils durchgeführt. In einem zweiten Schritt erfolgte eine Hochpassfilterung bei 10Hz zur Unterdrückung niederfrequenter Störsignale, hervorgerufen z.B. durch Atemexkursionsbewegungen.

Als nächstes wurden die durch die Herzaktion bedingten Einstreuungen beseitigt. Dazu dienten die bereits gesetzten QRS-Komplex-Marker. Für alle im jeweiligen Messfile vorkommenden Herzschläge wurde die gemessene Aktivität im Bereich 200ms vor und nach jedem Marker über die Anzahl aller Ereignisse innerhalb eines Messfiles für jeden Kanal getrennt gemittelt. Das so generierte Muster entsprach nun in jedem Kanal dem individuellen Artefakt welcher durch die Herzaktivität eingestreut wurde. Dieses so

generierte Template konnte zur EKG-Artefaktelimination verwendet werden. Dafür wurde dieses Signal wiederum an allen markierten Stellen vom Originalsignal abgezogen. Eine solche Kombination von Templatebildung und zusätzlichem Hochpassfilter wird als optimale Variante für die EKG Elimination angesehen (Drake und Callaghan 2006). Um Einschwingartefakte zu vermeiden, wurde das Template zusätzlich mit einer Cosinusfunktion gewichtet, sodass sein Einfluss an beiden Enden gleich 0 war (Mörl et al. 2010).

Aufgrund der Atemexkursionen während der Übungen und der damit verbundenen ständigen Änderung der Herzachse zeigte sich der Artefakt des EKG-Signals allerdings in ständig wechselnder Konfiguration. Daher war die komplette Elimination der EKG Artefakte durch die Bildung eines Templates nicht vollständig zu gewährleisten. Um dennoch möglichst alle Einstreuungen der Herzaktivität vom Rohsignal entfernen zu können, wurde das von einem bei 50Hz gesetzten Tiefpassfilter durchgelassene Signal vom Ursprungssignal abgezogen. Diese zusätzliche Prozedur zur Elimination des EKG Artefakts wurde zweimal durchgeführt.

Zum Schluss wurde das Rohsignal bei 300 Hz Tiefpass gefiltert und zur Elimination von ggf. durch das Stromnetz einstreuenden 50-Hz-Störsignale (und deren Vielfachen) wurde ein Bandsperrfilter bei 50Hz gesetzt.

Um die Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen wurden diese allgemeinen Algorithmen zur Artefaktelimination für alle gewonnenen Rohdaten in derselben Art und Weise durchgeführt.

Alle so aufbereiteten Daten wurden als rms-Werte (engl: root mean square) ausgegeben. Rms ist ein international gebräuchlicher Algorithmus (de Luca 1997) zur Gleichrichtung und Glättung von EMG Daten. Bei diesem Algorithmus wird, wie der Name bereits sagt, aus dem über einen festgelegten Zeitraum gemittelten und quadrierten EMG Signal die Wurzel gezogen.

3.4.3 Spezielle Datenverarbeitungen

Als erstes wurden aus den optisch identifizierten und mit einem Bereichsmarker versehenen Abschnitten der maximalen Muskelaktivität die Amplitudenmaxima extrahiert und als Referenzmaximum definiert. Dies geschah einzeln für jeden Muskel in

der Art, dass der individuelle Maximalwert, egal zu welchem Zeitpunkt und in welcher Wiederholung generiert, identifiziert und ausgegeben wurde.

Bezugsparameter (EMG-Normierung)

Da das OEMG-Signal mannigfaltigen individuellen Einflüssen unterliegt (Farina et al. 2002, de Luca 1997), wird, um die Vergleichbarkeit der Daten zu erhöhen bzw. deren Variabilität zu vermindern, üblicherweise eine Normierung durchgeführt. Für die vorliegende Untersuchung wurden mehrere verschiedene Normierungsmethoden verwendet, da für die gemessenen Daten im Vorfeld nicht geklärt werden konnte, welcher Algorithmus am besten geeignet ist, bzw. nicht jede Normierung gleich gut für spezielle Fragestellungen genutzt werden kann.

Für die weitere Auswertung der Daten wurden deshalb 3 verschiedene Parameter definiert, welche im Folgenden als Bezugsgrößen für die Verarbeitungs- und Interpretationsschritte dienten. Diese waren das Referenzmaximum, das übungsspezifische Aktivitätsmaximum und die intermuskuläre Koordination.

Das Referenzmaximum ist wie unter 3.2.2 beschrieben definiert. Damit kann das Beanspruchungsniveau im Verlauf jeder Übung in Bezug zum Maximalwert während der Referenzinspiration/-expiration ermittelt werden.

Das übungsspezifische Maximum ist die maximale Amplitude eines jeden Muskels im Verlauf jeder einzelnen Übung, unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt innerhalb der vier Gesangsübungen sie auftrat. Durch diese Bezugsgröße ist es möglich, die intramuskuläre Koordination, also das Aktivierungs-/Anstrengungsmaß eines Muskels für jede einzelne Übung zu jedem Zeitpunkt im Bezug zu seiner maximalen Aktivierung im Verlauf der Übung zu beurteilen. Damit ist das übungsspezifische Maximum unabhängig vom Referenzmaximum.

Die intermuskuläre Koordination ist definiert als der Anteil, den ein Muskel an der kumulativen Gesamtaktivität aller untersuchten Muskeln zu einem betrachteten Zeitpunkt hat.

Statische Fragestellungen

Für jede der vier Gesangsübungen waren, wie oben beschrieben, charakteristische Bereiche festgelegt und markiert worden.

Für die im Vokalausgleich markierten 5 Bereiche wurden die Muskelaktivitäten für die einzelnen Probanden getrennt für jeden Muskel und die relativen Bandauslenkungen in

jedem der fünf Bereiche gemittelt. Gleiches geschah in derselben Weise für die drei Bereiche des Dreiklangs, den Endtonbereich der Tonleiter und die drei Bereiche des Schwelltons. Die berechneten Mittelwerte der Bereiche wurden im Weiteren als quasi statische Werte betrachtet = statische Fragestellung.

Die oben erläuterten Bezugsparameter Referenzmaximum und intermuskuläre Koordination dienten als normierte Parameter, um die interindividuellen Abweichungen auszugleichen und so die ermittelten Werte besser vergleichen zu können. Es wurden also sowohl die ermittelten Aktivitätsmittelwerte als auch die Relativwerte in Bezug auf das Referenzmaximum und die momentane Gesamtmuskelaktivität (intermuskuläre Koordination) betrachtet.

Dynamische Fragestellungen

Für die dynamisch zu betrachtenden Bereiche der Einatemphase und des jeweiligen Gesamtverlaufs der vier Gesangsübungen kamen noch weitere rechnerische Bearbeitungsschritte hinzu.

Aufgrund der intra- und interindividuellen Unterschiede der Dauer sowohl der Einatemphase als auch der Übungen wurde zur besseren Vergleichbarkeit eine Zeitnormierung der zu untersuchenden Bereiche auf 100% mit 1% Genauigkeit durchgeführt. Dabei betrug die geduldete zeitliche Abweichung der einzubeziehenden Messungen wegen erwarteter hoher Differenzen zwischen den einzelnen Wiederholungen 50%. Sowohl für die Muskelaktivitäten als auch für die Bandauslenkungen erfolgte zur Glättung zusätzlich eine überlappende Mittelung der rms-Werte mit einem Fenster von 30ms.

Mithilfe der gewonnenen Daten konnten nun getrennt für jeden Probanden für alle Muskeln die mittleren Aktivitätsniveaus in den auf 100% normierten Zeitabschnitten über die 5 Wiederholungen ermittelt werden.

Die berechneten Mittelwerte wurden relativ zu den drei Parametern Referenzmaximum, übungsspezifisches Maximum und intermuskuläre Koordination (Anteil an der Gesamtaktivität zu einem definierten Zeitpunkt) betrachtet.

Durch die beschriebenen Normierungsvarianten sind nun prozentuale Muskelaktivitätsanteile ermittelt worden. Damit konnten interindividuelle Unterschiede ausgeglichen und die Daten für die weitere Auswertung und die statistischen Berechnungen besser genutzt werden.

3.5 Statistik

Da die zu betrachtenden Daten keiner Normalverteilung unterlagen, sind für die statistischen Auswertungen, die alle mittels SPSS (PASW Statistics 16.0 und 17.0) durchgeführt wurden, nichtparametrische Tests angewendet worden.

3.5.1 Reliabilität

Um sicherzustellen, dass die durch die Messungen erhobenen Daten reproduzierbar sind, wurde für die Einatemphase der vier Übungen eine Reliabilitätsanalyse durchgeführt. Diese wurde für alle beschriebenen Bezugsgrößen der Messwerte einzeln mit der Bildung des Intra-Class-Korrelationskoeffizient durchgeführt.

Für die statischen und auch die dynamischen Fragestellungen der einzelnen Gesangsübungen war eine solche Prüfung nach der erwähnten Methode nicht möglich, da die Messsituationen in den einzelnen Übungen im Gegensatz zur Einatemphase verschieden und damit nicht vergleichbar waren.

3.5.2 Statische Betrachtungen

In diese Betrachtungen wurden die als Median ermittelten mittleren Aktivitätswerte der einzelnen Muskeln und die ermittelten relativen Aktivitätswerte in Bezug auf die zwei zu betrachtenden Parameter Referenzmaximum und intramuskuläre Koordination für die fünf Bereiche des Vokalausgleiches, die drei Bereiche des Dreiklangs und des Schwelltones sowie der Endton der Tonleiter einbezogen. Für die Auswertung dieser statischen Daten wurden verschiedene Fragestellungen analysiert.

Als erstes wurde die Frage untersucht, ob sich die verschiedenen Muskelaktivitäten und die verschiedenen relativen Bandauslenkungen in den markierten Bereichen unterscheiden. Dazu wurde der Friedman Test angewendet. Zum Vergleich von mehr als zwei unabhängigen Stichproben ordnet dieser den Stichprobenwerten, in unserem Fall den durchschnittlichen/medianen Muskelaktivitäten der unterschiedlichen Bereiche, Rangzahlen zu und stellt diese im Verlauf dar. Durch die Zuordnung von Rangzahlen ist eine Vergleichbarkeit der interindividuell stark schwankenden medianen Amplitudenwerte möglich.

Die Frage, ob in unterschiedlichen Bereichen oder zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten ein signifikanter Unterschied der Muskelaktivität besteht, wurde mit der kritischen Rangzahldifferenz geklärt. Diese wird anhand des Stichprobenumfangs und der Anzahl der Messzeitpunkte mit dem Test auf Kontraste (Lohse et al. 1982) berechnet.

Die Frage nach geschlechtsspezifischen Unterschieden wurde mit dem Mann-Whitney-U-Test geprüft. Dieser nichtparametrische Test für unabhängige Stichproben untersucht, ob sich zwei verschiedene Stichproben in ihrer zentralen Tendenz unterscheiden. Dies geschah im Hinblick auf die Parameter Referenzmaximum und intermuskuläre Koordination.

3.5.3 Dynamische Betrachtungen

Für diese Betrachtungen wurden die ermittelten Daten für die Einatemphasen der einzelnen Übungen und deren Gesamtverläufe ausgewertet. Betrachtet wurde der in 10% Schritten unterteilte und auf 100% normierte Zeitverlauf sowohl der Einatemphase als auch der Übungsverläufe.

Als erstes wurde auch hier wiederum der Unterschied im Aktivitätsverlauf der 10 Zeitabschnitte mit dem Test nach Friedman untersucht. Dafür wurden jeweils aus den Messpunkten, die innerhalb eines 10% Abschnitts lagen, getrennt für jeden Probanden und jeden Muskel, der Median gebildet und mit den daraus hervorgehenden Werten dann der Friedman Test durchgeführt. Die berechnete kritische Rangzahldifferenz lag bei dieser Fragestellung aufgrund des größeren Stichprobenumfangs höher als bei der Analyse der statischen Bereiche.

Geschlechtsspezifische Unterschiede wurden erneut mit dem Mann-Whitney-U-Test untersucht. Als Vergleichsgrößen zwischen Männern und Frauen galten auch hier die Parameter Referenzmaximum und intermuskuläre Koordination. Zusätzlich zu den U-Tests der statischen Untersuchungen wurde auch das Vorhandensein eventueller geschlechtsspezifischer Unterschiede bezüglich des übungsspezifischen Aktivitätsmaximums überprüft.

4 Ergebnisse

4.1 Statische Betrachtungen

Im Folgenden werden die statischen Analysen für die vier Gesangsübungen dargestellt, wobei für jede Gesangsübung die in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Betrachtungsbereiche berücksichtigt wurden.

4.1.1 Vokalausgleich

4.1.1.1 Muskelaktivitäten über die fünf Vokalbereiche

4.1.1.1.1 mittlere Muskelaktivitäten über die fünf Vokalbereiche

Wie in Abbildung 3 zu sehen, steigt das mittlere Aktivitätsniveau fast aller Muskeln beim Singen des Vokalausgleiches an. Für OI ist dies beidseits am deutlichsten zu sehen. Er erreicht die höchsten absoluten Amplitudenwerte und steigt im Median auf über das doppelte seiner Anfangsaktivität.

Wie auch die tiefe Rückenmuskulatur und Teile der Hals- und Nackenmuskulatur (MF, TD l, QL r und SCM r) zeigt er große interindividuelle Schwankungsbreiten.

Für alle kontinuierlich in ihrer Aktivität ansteigende Muskeln (Bauchmuskulatur (RA, OI, OE), oberflächliche Rückenmuskulatur (EI, EL, LD), Teile der Thoraxmuskulatur (SA), Nackenmuskulatur (TD) und Atemmuskulatur (ICO5, ICO8, DP)) gilt, dass nach Berechnung der Rangzahlverläufe und deren Unterschiedsprüfung mit der kritischen Rangzahldifferenz (Abbildung 4) zwischen zwei direkt aufeinander folgenden Vokalbereichen keine signifikanten Änderungen zu beobachten sind. Eine Signifikanz ergibt sich erst beim Vergleich weiter auseinander liegender Vokalbereiche und ist am deutlichsten zwischen den Vokalen A und U für die oben aufgeführten kontinuierlich in ihrem Aktivitätsniveau ansteigenden Muskeln.

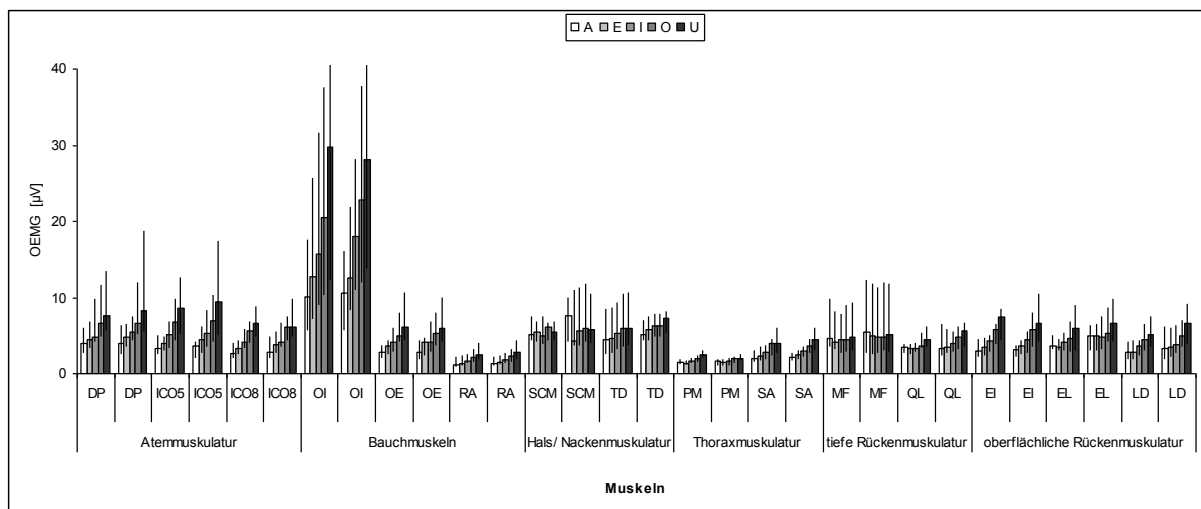


Abbildung 3 Vokalausgleich: mittlere Muskelaktivitäten

Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte der einzelnen Muskeln über die fünf Vokalbereiche für alle Probanden mit oberem und unterem Quartil

Die Muskeln beider Körperseiten sind in den Abbildungen 3 bis 20 immer nebeneinander, jeweils links der linke und rechts daneben der rechte Muskel, dargestellt.

Die tiefe Rückenmuskulatur (MF und QL), Teile der Thoraxmuskulatur (PM) und die Halsmuskulatur (SCM) zeigen einen anderen Aktivitätsverlauf. MF steigt ebenso wie QL und PM erst nach einem primären Aktivitätsabfall zwischen dem ersten und dem zweiten Vokalbereich in seinem Amplitudenniveau an. Werden die Rangzahlverläufe (Abbildung 4) betrachtet, ist dieser primäre Aktivitätsabfall allerdings für keinen der drei Muskeln signifikant. Jedoch können die sich anschließenden Aktivitätsanstiege zum Ende der Übung hin für PM und QL statistisch gesichert werden. MF zeigt über die gesamte Übung zu keinem Betrachtungszeitraum eine signifikante Änderung in seinem Aktivitätsverhalten. Er ist damit als relativ konstant in seiner Aktivität anzusehen.

Der bei SCM beobachtete Aktivitätsabfall dauert bis zum dritten Vokalbereich I und ist bei der Betrachtung des Tests nach Friedman und der daraus hervorgehenden Darstellung der Rangzahlenverläufe in Abbildung 4 im Gegensatz zu den Abfällen bei MF und QL signifikant. Der bei SCM nach einem signifikanten Anstieg zum O folgende Aktivitätsabfall zum U jedoch nicht.

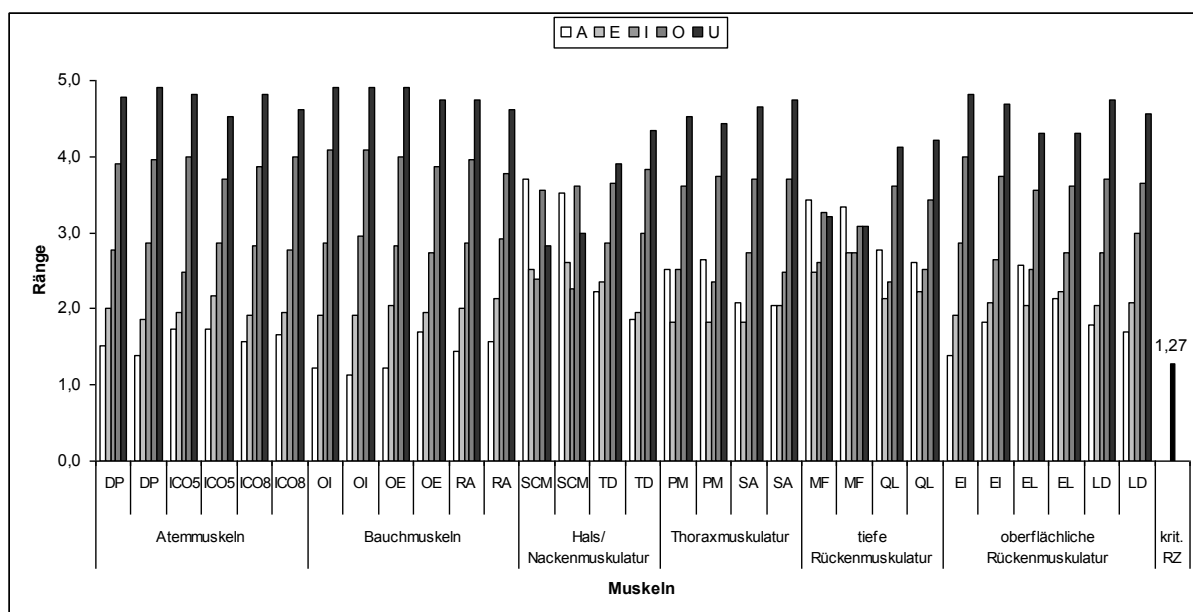


Abbildung 4 Vokalausgleich: Mittlere Rangzahlen nach Friedman Test (Absolutwerte)

Dargestellt sind die mittleren Rangzahlen der Mediane der Absolutwerte der einzelnen Muskeln über die fünf Vokalbereiche und die kritische Rangzahldifferenz (1,27) als schwarzer Balken am Rand der Abbildung

Die Darstellung der Rangzahlen über die 5 Vokalbereiche zeigt, dass für die einzelnen Muskeln und die aufeinander folgenden Vokale selten die „glatten“ Rangziffern 1,2,3,4,5 erreicht werden. Diesen Rangfolgenverlauf zeigen am ehesten die Aktivitätsverläufe der Atemmuskulatur, der Bauchmuskulatur und der tiefen Rückenmuskulatur. Deutlich andere Rangfolgen ohne klare 1,2,3,4,5 Reihung für die aufeinander folgenden Vokalbereiche zeigen vor allem MF, QL und SCM.

4.1.1.1.2 Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf das Referenzmaximum

Bezieht man die ermittelten Amplitudenwerte auf das für jeden Probanden ermittelte Referenzmaximum (Abbildung 5) zeigt sich, dass sich einige Muskeln diesem Wert über den Verlauf der fünf Vokale stark annähern und einige Probanden sogar höhere Aktivitätswerte als in der Referenzmessung erreichen. Das wird am deutlichsten bei TD, PM I (links) und STM r (rechts). Diese erreichen bei 25% der Probanden sogar Werte von über 160% des Referenzwertes (TD I).

Mit Ausnahme dieser drei Muskeln lassen sich die anderen Muskeln in zwei Gruppen unterteilen: Eine Gruppe, deren Aktivitätsniveau sich zu Beginn der Übung im Bereich von ca. 7% (ICO5 r) bis ca. 30% (EL I) der Referenzmaxima befindet, zeigt einen

kontinuierlichen Anstieg der Aktivität bis ca. 40% (EL I). Zu dieser Gruppe gehören neben der Atemmuskulatur die Bauch-, Thorax- und die oberflächliche Rückenmuskulatur. Die andere Gruppe, bestehend aus der tiefen Rückenmuskulatur (QL und MF), startet schon zu Beginn auf einem höheren Level der Aktivierung (ca. 27% bis 52 %) und verändert dieses Niveau im Verlauf der Übung nur wenig oder verringert es sogar wie MF (QL ca. 34% bis 42%, MF ca. 38% bis 40%). Auch SCM zeigt vor allem links eine Abnahme der relativen Aktivität in Bezug auf die Referenz, allerdings auf einem wesentlich höheren Niveau.

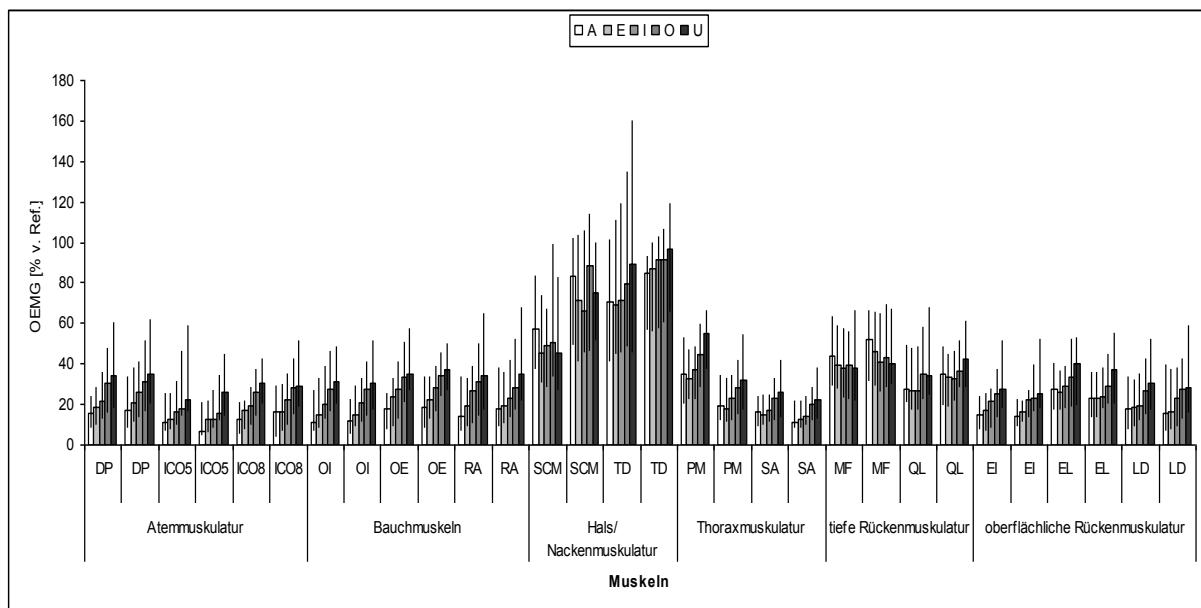


Abbildung 5 Vokalausgleich: Muskelaktivierung im Vergleich zur Referenz

Dargestellt ist der Median der prozentualen Muskelaktivitäten der einzelnen Muskeln über die fünf Vokalbereiche im Vergleich zum Referenzmaximum mit oberem und unterem Quartil

Eine statistische Aufbereitung dieser relativen Daten mittels des Friedman Tests erübrigt sich an dieser Stelle und bei allen weiteren Betrachtungen in Bezug auf die Referenzwerte, da dadurch lediglich eine konstante Verschiebung aller Werte erfolgt, welche keinen Einfluss auf die Rangverläufe der einzelnen Muskeln im Vergleich zu den Absolutwerten hat.

4.1.1.1.3 Intermuskuläre Koordination über die 5 Vokalbereiche

Bezüglich der intermuskulären Koordination (Abbildung 6) ist zunächst zu bemerken, dass auch hier, wie bei Kenntnis der Amplitudenwerte nicht anders zu erwarten, der OI

prozentual den höchsten Anteil an der muskulären Gesamtaktivität hat (bis ca. 12%). Eine Tendenz zur höheren Aktivierung auf der rechten Körperhälfte ist für ihn zusätzlich festzustellen. Alle anderen Muskeln bewegen sich in einem Anteilsspektrum von ca. 1% (PM r) bis ca. 5% (MF r). Betrachtet man die Aktivitätsanteile, die jeder einzelne Muskel während eines Vokalbereichs an der muskulären Gesamtaktivität hat, zeigten sich auch hier wiederum verschiedene Gruppen von Muskeln mit ähnlichem Verhalten während der Übung.

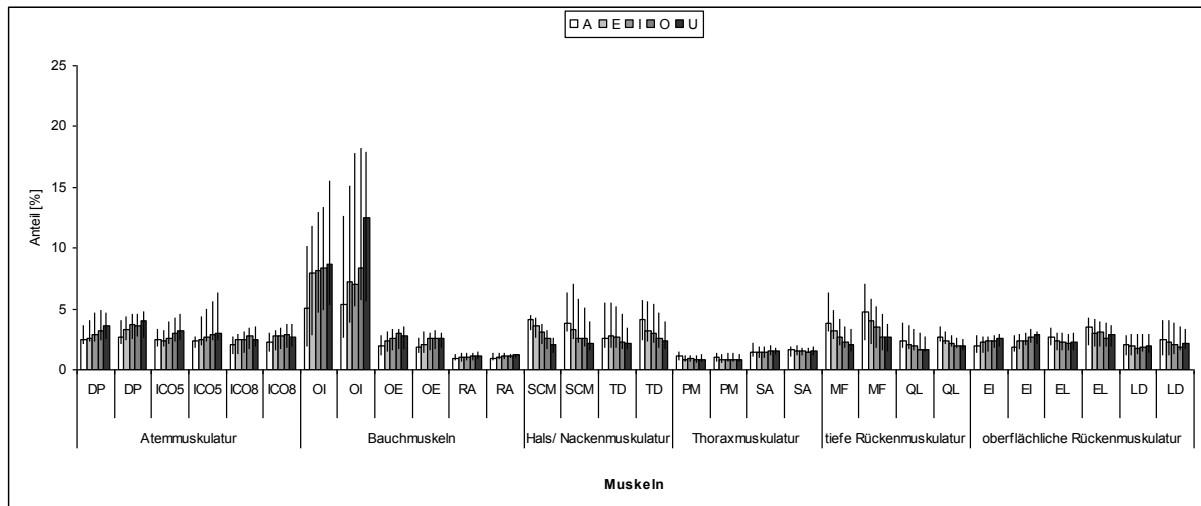


Abbildung 6 Vokalausgleich: intermuskuläre Koordination

Dargestellt ist der Median der prozentualen Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität mit oberem und unterem Quartil

So scheint es, als ob RA, die oberflächliche Rückenmuskulatur (EI, EL, LD), die Thoraxmuskulatur (SA, PM) und ICO8 über die 5 Bereiche hinweg einen eher konstanten Aktivitätsanteil zeigen mit nur leichten Tendenzen nach oben oder unten. Nach der statistischen Analyse dieses Verlaufs mithilfe des Friedman Test zeigen einige dieser Muskeln aber trotz ihrer geringen absoluten Änderungen ein systematisches Verhalten über alle Probanden hinweg (Abbildung 7). Für RA, EI und ICO8 in der Weise, dass ein signifikanter Anteilsanstieg über die fünf Vokale nachweisbar ist. EL zeigt zumindest für die linke Seite einen signifikanten Anteilsabfall. Nur für die obere Thoraxmuskulatur bestätigt sich, dass es keine systematischen Aktivitätsanteilsänderungen über die fünf Vokale gibt.

Die Aktivitätsanteile von QL, MF, SCM und TR, also die tiefe Rückenmuskulatur und die Hals- und Nackenmuskulatur, fallen im Verlauf ab. Dies ist auch statistisch zu sichern. Für OI, OE, ICO5 und DP sind teilweise deutlich ansteigenden Aktivitätsanteile (OI r von ca. 5% auf ca. 12%) als systematische Unterschiede signifikant.

Auffällig ist, dass sich ein Anteilsanstieg im Median zwischen zwei Bereichen für einige Muskeln wie z.B. DP links (hier zwischen O und U) bei der statistischen Rangzahlanalyse doch als ein Anteilsabfall über die Probandengruppe darstellt, auch wenn dieser nicht signifikant ist (Abbildung 7).

Dieses Phänomen lässt sich durch die unterschiedlichen Berechnungsgrundlagen von Median und Rangzahl erklären. Betrachtet der Median nur die aktuellen Aktivitätswerte aller Probanden zum Beispiel zum Zeitpunkt des Vokales U, unabhängig davon wie dieser Wert im Bezug zum vorhergehenden Aktivitätswert des Vokales O steht, so analysiert die Rangzahlanalyse bei allen Probanden in welcher Aktivitätsreihenfolge die 5 Vokale zueinander stehen. So entsteht dann die Diskrepanz zwischen einem Anstieg im Median und der Tatsache, dass z.B. beim letzten Vokal über alle Probanden hinweg im Vergleich zum vorletzten für DP eine geringere Aktivität nachweisbar ist.

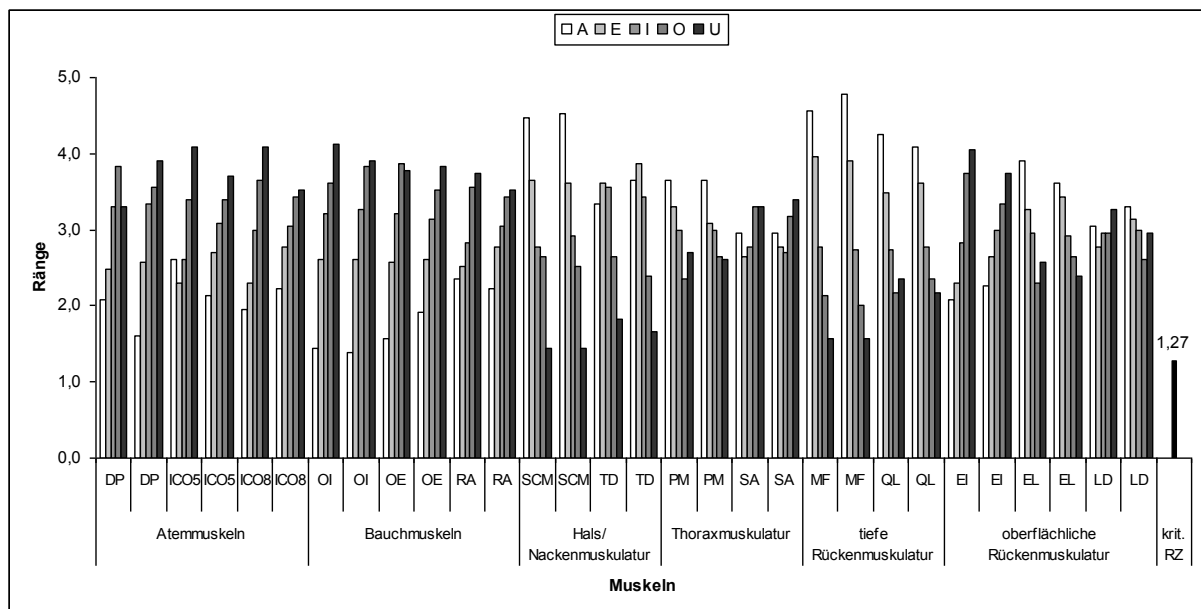


Abbildung 7 Vokalausgleich mittlere Rangzahlen nach Friedman (intermuskulär)

Dargestellt sind die mittleren Rangzahlen der anteiligen Aktivitäten der einzelnen Muskeln über die fünf Vokalbereiche und die kritische Rangzahldifferenz (1,27) als schwarzer Balken am Rand der Abbildung

4.1.1.2 Geschlechtsspezifische Unterschiede verschiedener Bezugsparameter

Da aufgrund der interindividuellen Unterschiede der absoluten rms - Werte ein direkter Vergleich dieser Werte nicht zulässig ist, wurden die in 3.4.3 beschriebenen Bezugsparameter für eine Normierung genutzt. Um die geschlechtsspezifischen Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Studenten zu charakterisieren,

wurde der Mann-Whitney-U-Test einzeln für jeden dieser Bezugsparameter durchgeführt.

4.1.1.2.1 Muskuläre Aktivität relativ zur Referenz

Vergleicht man männliche und weibliche Probanden dahingehend, welches Aktivierungsniveau die Muskeln während der Übung im Bezug zur Referenzmessungen erreichen, zeigt sich schon auf den ersten Blick eine zentrale Tendenz. In Tabelle 4 ist deutlich zu erkennen, dass zum größten Teil jeweils die Frauen höhere Aktivitätslevel im Vergleich zu den Männern erreichen. Signifikante Unterschiede zeigen sich allerdings nur für die dunkelrot unterlegten Muskeln. Dies betrifft häufiger die rechte Seite zum Anfang der Übung und die Atemmuskulatur. Ein ebenfalls signifikant höheres Beanspruchungsniveau ist für EL und QL zu verzeichnen, wobei bei diesen die linke Seite überwiegt. Lediglich SCM und OI auf der rechten Seite zeigen höhere relative Aktivitäten bei den männlichen Probanden (blau unterlegt), welche sich jedoch nicht signifikant von denen der Frauen unterscheiden.

Tabelle 4 Vokalausgleich: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden Vokalbereich

Dargestellt sind hell farblich hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und dunkel farblich hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

A	E	I	O	U	Vokalbereiche	A	E	I	O	U
Links					Muskeln	Rechts				
					DP					
					ICO5					
					ICO8					
					OI					
					OE					
					RA					
					SCM					
					TD					
					PM					
					SA					
					MF					
					QL					
					EI					
					EL					
					LD					

4.1.1.2.2 Intermuskuläre Koordination

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Unterschieden bezüglich des Anspannungsniveaus, bei dem für die Frauen beim Großteil der Muskeln höhere relative Aktivitäten nachweisbar sind, zeigt sich bei Betrachtung der Aktivitätsanteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität (Tabelle 5) kein so einheitliches Bild.

Es ist zu bemerken, dass OI, die tiefe und oberflächliche Rückenmuskulatur (QL, MF, EI, EL), die Nacken-/Halsmuskulatur (SCM, TD) und SA bei den Männern jeweils zu einem höheren Anteil als bei den Frauen zur Generierung der Gesamtaktivität genutzt werden. Der Effekt ist wieder am Anfang der Übung und für die rechte Seite auffälliger. Signifikante Unterschiede ergeben sich allerdings nur für EI bei den Männern und für ICO5 bei den Frauen - und das wiederum nur auf der rechten Seite.

Tabelle 5 Vokalausgleich: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden Vokalbereich

Dargestellt sind hell farblich hinterlegt die höheren anteiligen Muskelaktivitäten im Median und dunkel

farblich hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

A	E	I	O	U	Vokalbereiche	A	E	I	O	U
Links					Muskeln	Rechts				
					DP					
					ICO5					
					ICO8					
					OI					
					OE					
					RA					
					SCM					
					TD					
					PM					
					SA					
					MF					
					QL					
					EI					
					EL					
					LD					

4.1.2 Dreiklang

4.1.2.1 Muskelaktivitäten über die drei Bereiche des Dreiklangs

4.1.2.1.1 mittlere Muskelaktivitäten über die drei Bereiche

Ähnlich wie bei den fünf Bereichen des Vokalausgleiches verhalten sich die Muskelaktivitäten bei den drei Bereichen des Dreiklangs (Abbildung 8). Es ist wiederum eine Dominanz von OI und für fast alle Muskeln ein Aktivitätsanstieg über die drei Bereiche feststellbar. Lediglich SCM zeigt einen gegenläufigen Verlauf, welcher zumindest für die rechte Seite auch signifikant ist (Abbildung 9). Im Gegensatz zum biphasischen Verlauf beim Vokalausgleich zeigt MF ein kontinuierlich ansteigendes Aktivierungsverhalten über die gesamte Übung hinweg.

Die Absolutwerte betrachtend, zeigt die Atemmuskulatur (ICO5, ICO8, DP) nach OI die höchsten Amplitudenwerte, wobei ICO5 sowohl links als auch rechts am auffälligsten ist. Die größten interindividuellen Schwankungsbereiche zeigen auch hier wieder OI und zusätzlich die Atemmuskulatur.

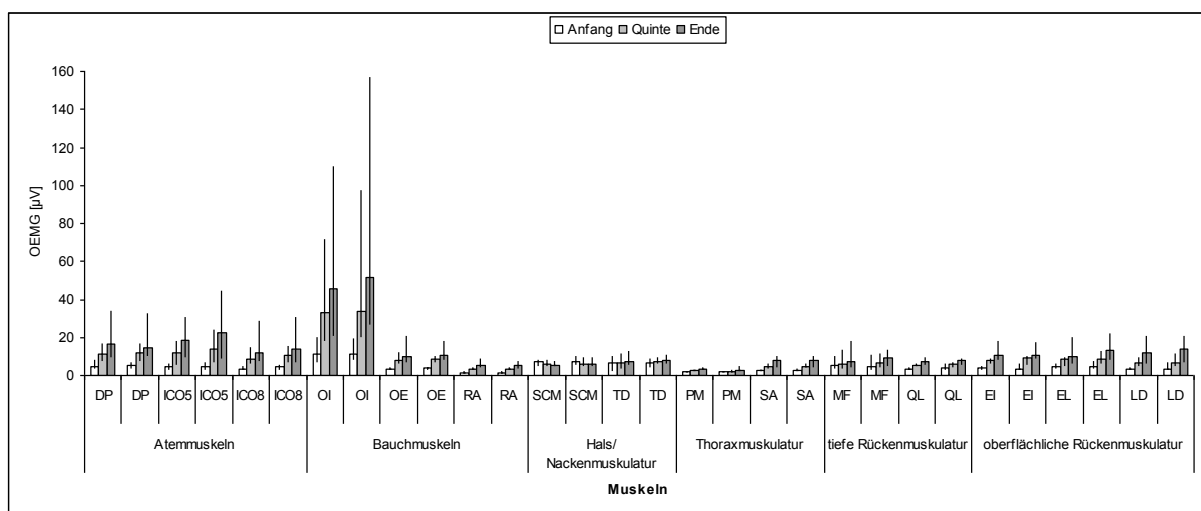


Abbildung 8 Dreiklang: mittlere Muskelaktivitäten

Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte der einzelnen Muskeln über die drei Dreiklangsbereiche mit oberem und unterem Quartil

Betrachtet man die kritische Rangzahldifferenz, so ergeben sich für viele Muskeln, wie in Abbildung 9 zu sehen, signifikante Unterschiede zwischen zwei benachbarten Bereichen. Nur SCM links zeigt als einziger Muskel keine signifikanten Änderungen

über die drei betrachteten Bereiche, während für MF und PM signifikante Unterschiede im Gesamtverlauf der Übung nachzuweisen sind, jedoch nicht zwischen direkt benachbarten Bereichen.

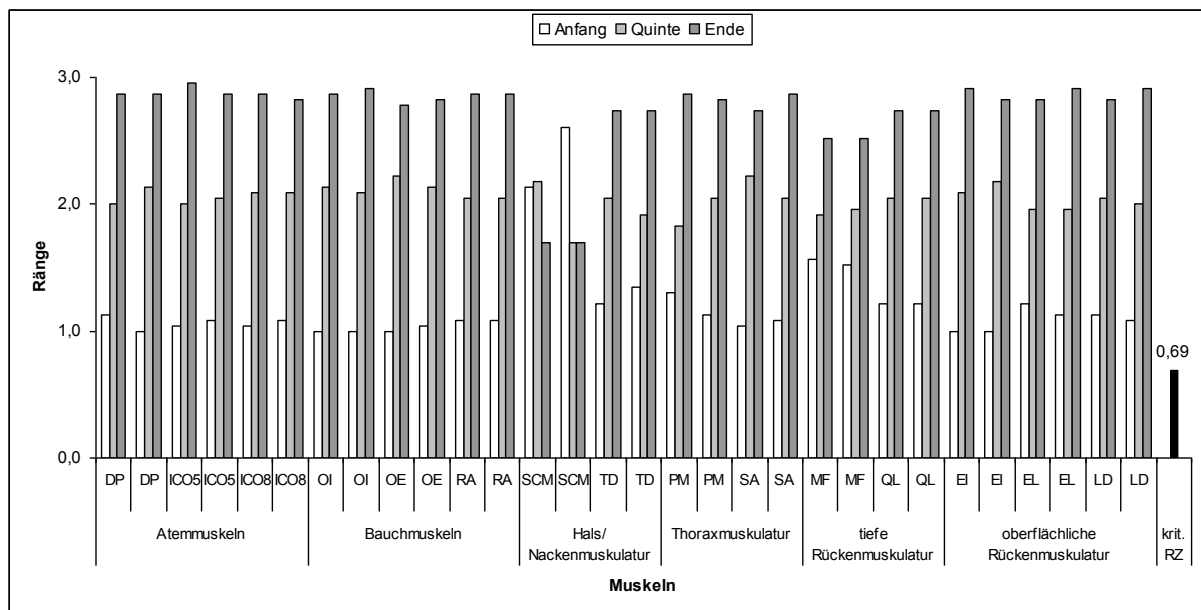


Abbildung 9 Dreiklang: Mittlere Rangzahlen nach Friedman Test (Absolutwerte)

Dargestellt sind die mittleren Rangzahlen der Absolutmittelwerte der einzelnen Muskeln über die fünf Vokalbereiche und die kritische Rangzahldifferenz (0,69) als schwarzer Balken am Rand der Abbildung

Betrachtet man die Rangzahlen, zeigen alle Muskeln bis auf SCM eine ansteigende Rangfolge. Außer beim MF sind diese Rangzahlen sogar annähernd ganze Zahlen, was auf äußerst geringe Abweichungen von diesem Muster innerhalb der Probandengruppe schließen lässt.

4.1.2.1.2 Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf Referenzmaximum

Wie schon beim Vokalausgleich ist es auch bei der Dreiklangsübung wieder TD, für den im Vergleich zur Referenzmessung der höchste Aktivierungsgrad gemessen wurde (Abbildung 10). Im Median erreicht er ein Aktivierungsniveau von mehr als 100% des Referenzwertes und steigt bei 25% der Probanden sogar bis über 160% an. Bei SCM sind auf der rechten Seite bei mindestens 25% der Probanden schon zu Beginn der Übung Aktivierungen von über 100% zu beobachten, welche dann aber im Gegensatz zum TD abfallen. Alle anderen Muskeln beginnen auf einem Niveau zwischen 13%

(ICO) und 37% (PM) und steigern sich über die drei Bereiche kontinuierlich auf 41% (SA) bis 83% (DP). Auffällig ist, dass OI, für den absolut die höchsten Aktivierungssteigerungen nachweisbar sind, im Vergleich zu seinem Referenzmaximum nur einen relativen Aktivitätswert von maximal 77,7 % im Median erreicht. Insgesamt befinden sich die relativen Aktivitätswerte am Ende der Übung auf einem höheren Niveau als dies beim Vokalausgleich der Fall war.

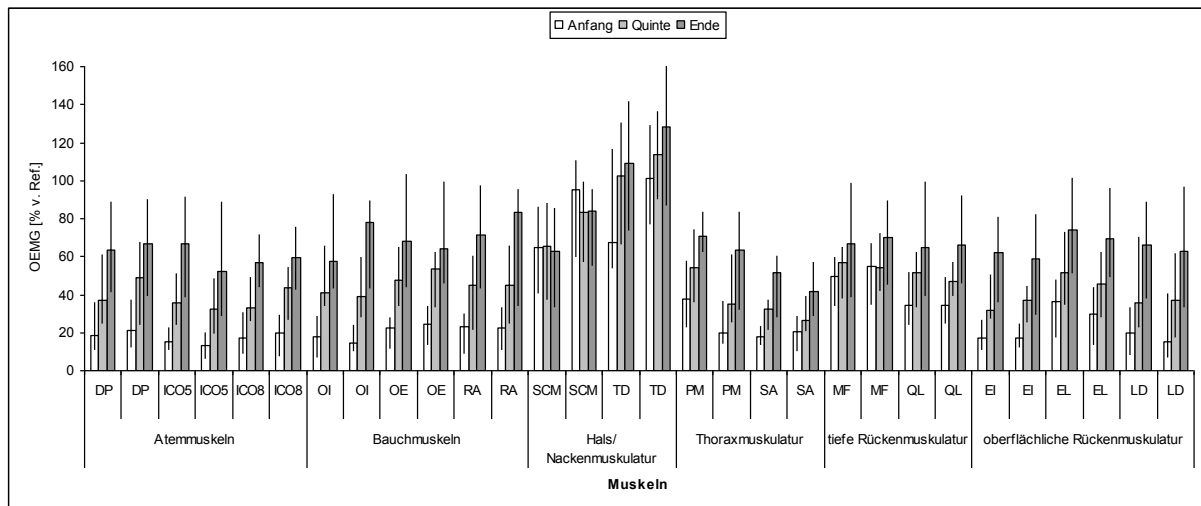


Abbildung 10 Dreiklang: Muskelaktivierung im Vergleich zur Referenz

Dargestellt ist der Median der prozentualen Muskelaktivitäten der einzelnen Muskeln über die drei Dreiklangsbereiche im Vergleich zum Referenzmaximum mit oberem und unterem Quartil

4.1.2.1.3 Intermuskuläre Koordination

Die Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität betrachtend (Abbildung 11), trägt wieder der OI den größten Anteil. Auch ist die rechte Seite der linken wie schon beim Vokalausgleich überlegen. Für die linke Seite ist noch zu bemerken, dass im letzten Abschnitt der Aktivitätsanteil von OI zugunsten anderer Muskeln abfällt. Allerdings lässt sich dieser Abfall im Median statistisch nicht nachweisen (Abbildung 12).

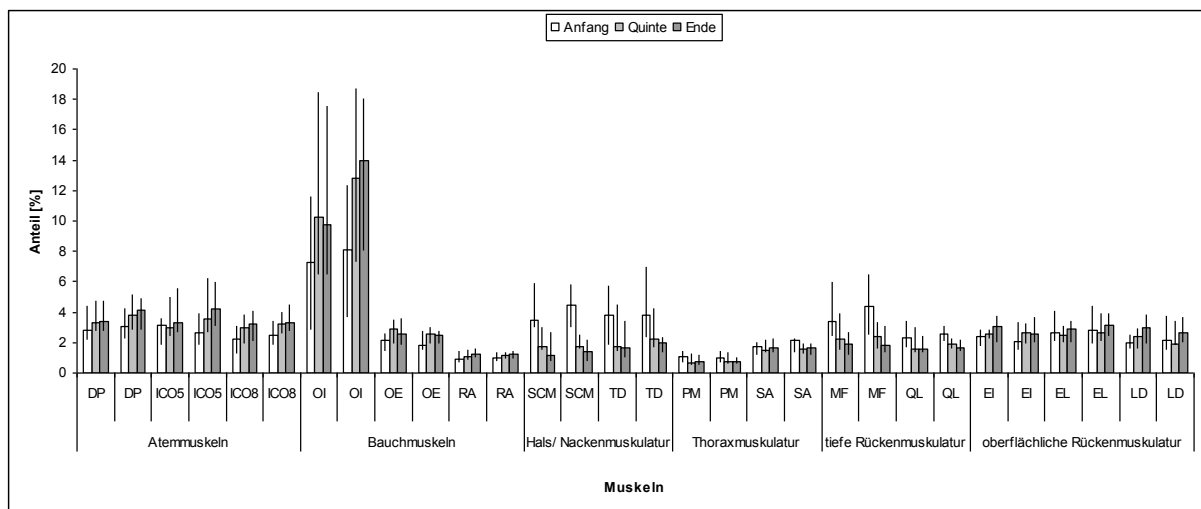


Abbildung 11 Dreiklang: intermuskuläre Koordination

Dargestellt ist der Median der prozentualen Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität mit oberem und unterem Quartil

Den Verlauf der Aktivitätsanteile über die Übung betrachtend (Abbildung 11), lassen sich wieder verschiedene Gruppen unterscheiden. In der ersten Gruppe findet sich die Bauchmuskulatur (RA, OI, OE), die oberflächliche Rückenmuskulatur (EI, EL, LD) und die Atemmuskulatur (ICO5, ICO8, DP), für die im Verlauf der Übung ein überwiegend zunehmender Anteil charakteristisch ist, der bis auf EL auch als signifikant systematischer Anstieg imponiert. Einige dieser Muskeln (OI I, OE, EI r) zeigen allerdings im letzten Bereich schon wieder Anteilsabfälle. Diese sind aber bei Beurteilung der Rangzahlverläufe nicht signifikant (Abbildung 12).

Daneben existiert eine Gruppe, bestehend aus der tiefen Rückenmuskulatur (MF, QL), der oberen Thoraxmuskulatur (PM) und der Hals-/Nackenmuskulatur (SCM, TD), mit abfallenden Anteilen. Genau diese Verläufe lassen sich statistisch auch als signifikant sichern.

Es ist bemerkenswert, dass die Anteilsabfälle bei SCM und TD am stärksten ausgebildet sind, insbesondere weil ja gerade diese beiden Muskeln im Vergleich zur Referenzmessung die individuell höchsten relativen Anteile ihrer Aktivität erreicht haben und diese vor allem für TD bis zum Ende hin anstiegen. Dennoch übersteigen die relativen Amplitudenveränderungen der anderen Muskeln die dieser beiden.

Ein ähnliches Verhältnis zwischen Verlauf von Median und Rangzahlen wie beim Vokalausgleich für DP links zeigt sich auch beim Dreiklang, jedoch diesmal für die rechte Seite.

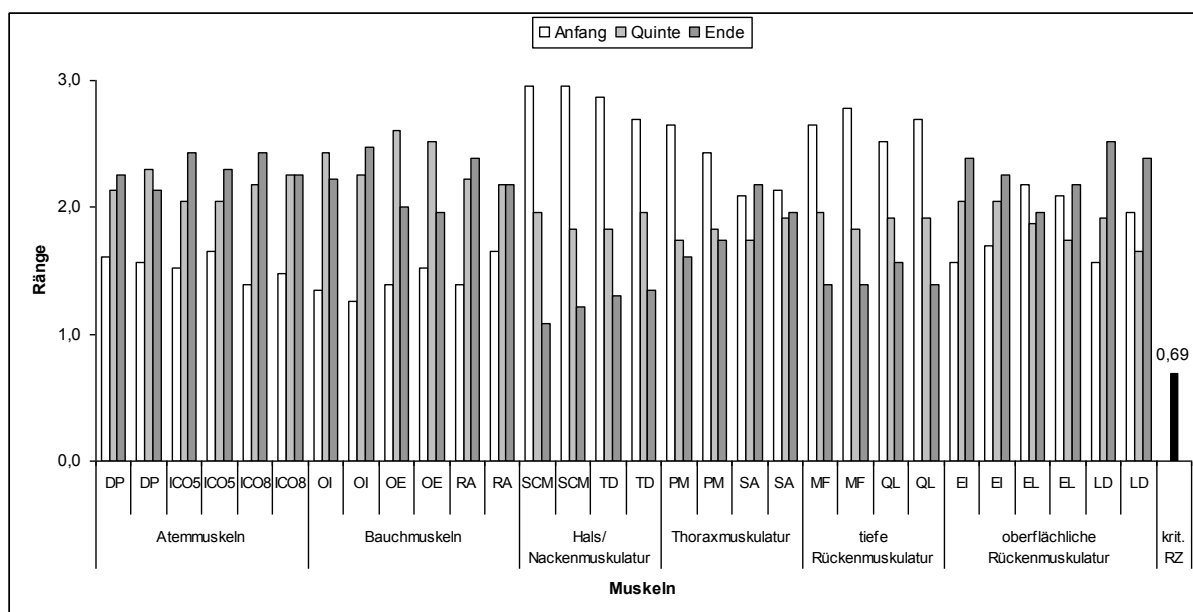


Abbildung 12 Dreiklang: mittlere Rangzahlen nach Friedman (intermuskulär)

Dargestellt sind die mittleren Rangzahlen der einzelnen Muskeln über die fünf Vokalbereiche und die kritische Rangzahlendifferenz (0,69) als Orientierungsbalken an der Seite.

4.1.2.2 Geschlechtsspezifische Unterschiede verschiedener Parameter

4.1.2.2.1 Muskuläre Aktivität relativ zur Referenz

Wie schon beim Vokalausgleich zeigen sich auch beim Dreiklang geschlechtsspezifische Unterschiede bezüglich des Beanspruchungsniveaus der Muskeln (Tabelle 6). Wieder sind es vor allem die weiblichen Probanden, welche überwiegend höhere Muskelaktivierungen im Vergleich zur Referenzmessung aufweisen. Allerdings werden in dieser Übung von den Männern für eine zunehmende Anzahl an Muskeln ebenfalls höhere Aktivierungslevel erreicht. Zusätzlich zu den schon im Vokalausgleich beschriebenen OI und SCM sind es beim Dreiklang auch Teile der Bauch-, Rücken-, Hals-, und Thoraxmuskulatur, die in einigen Übungsbereichen bei den Männern höchste Werte erreichen. Signifikant sind diese Unterschied jedoch nicht.

Es sind mit Dominanz der rechten Seite wieder QL, ICO8 und DP, welche bei den Frauen in wenigen Bereichen signifikant höhere Aktivierungslevel zeigen. Zusätzlich zu diesen Muskeln, welche schon im Vokalausgleich in dieser Hinsicht auffällig waren, zeigen beim Dreiklang auch noch TD und MF signifikante Unterschiede.

Tabelle 6 Dreiklang: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden Dreiklangsbereich

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Anfang	Quinte	Ende	Dreiklangsbereiche	Anfang	Quinte	Ende
Links			Muskeln	Rechts		
			DP			
			ICO5			
			ICO8			
			OI			
			OE			
			RA			
			SCM			
			TD			
			PM			
			SA			
			MF			
			QL			
			EI			
			EL			
			LD			

4.1.2.2.2 Intermuskuläre Koordination

Beim Geschlechtervergleich in Bezug auf die intermuskuläre Koordination (Tabelle 7) zeigt sich wie schon beim Vokalausgleich ein heterogenes Bild bezüglich der Aktivierungsanteile der einzelnen Muskeln bei Männern und Frauen. Für die Männer überwiegt hier wieder OI. Die Dominanz der Rückenmuskulatur ist allerdings nicht mehr so deutlich zu sehen. Lediglich für EI wurden am Beginn der Übung auf der rechten Seite signifikant höhere Aktivierungsanteile bei den Männern ermittelt. Auch die Dominanz für SCM und TD bei den Männern ist nicht mehr nachweisbar. Es werden im Gegenteil für SCM signifikant höhere Level bei den Frauen gefunden. Neben SCM zeigen sich zusätzlich signifikant höhere Aktivierungsanteile bei den Frauen für OE und PM besonders am Ende der Übung. Für Männer werden höhere anteilige Aktivierungen wiederum für ICO8 und DP gefunden und dies ebenfalls besonders zum Ende der Übung hin.

Tabelle 7 Dreiklang: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden Dreiklangsbereich

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Anfang	Quinte	Ende	Dreiklangsbereiche	Anfang	Quinte	Ende
Links			Muskeln	Rechts		
			DP			
			ICO5			
			ICO8			
			OI			
			OE			
			RA			
			SCM			
			TD			
			PM			
			SA			
			MF			
			QL			
			EI			
			EL			
			LD			

4.1.3 Tonleiter

Da in der Tonleiter Übung mit dem Endton nur ein markierter Bereich als statischer Parameter interpretiert werden soll, erübrigt sich eine Verlaufsbetrachtung über die Übung.

Da dieser Ton das Ende der Tonleiter markiert, ist aber eine vergleichende Betrachtung zu den Endbereichen der anderen Übungen möglich.

4.1.3.1 Muskelaktivitäten über den Endtonbereich der Tonleiter

4.1.3.1.1 mittlere Muskelaktivitäten über den Endtonbereich

Wie schon bei allen anderen Übungen zeigt OI absolut die höchsten Aktivitätswerte, während für RA und PM die niedrigsten Werte nachgewiesen werden (Abbildung 13).

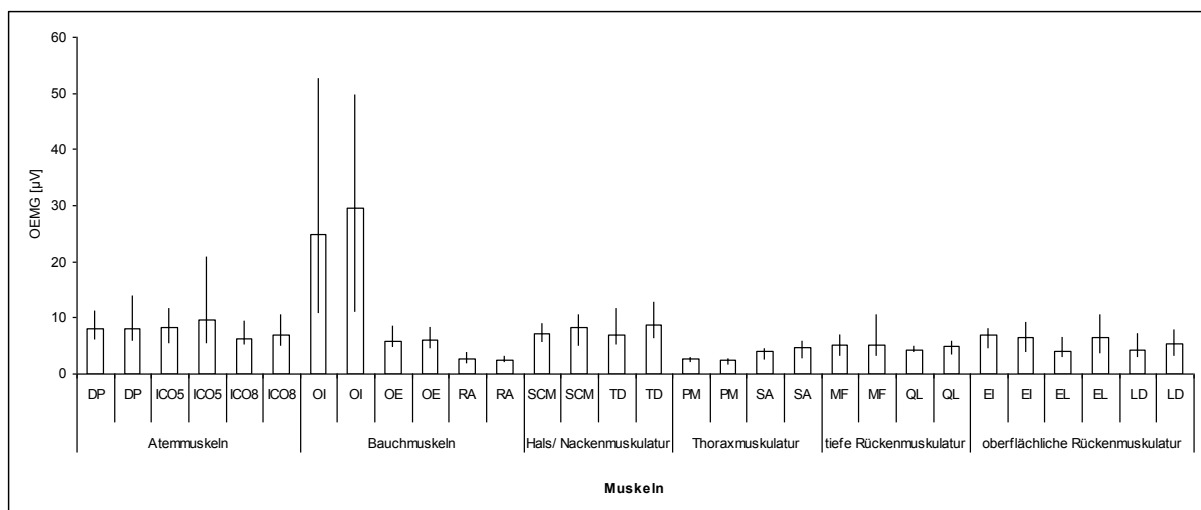


Abbildung 13 Endton Tonleiter: mittlere Muskelaktivitäten

Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte der einzelnen Muskeln im Endtonbereich der Tonleiter mit oberem und unterem Quartil

4.1.3.1.2 Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf das Referenzmaximum

Auch bei den Vergleichen der Aktivität zu den Referenzmaxima (Abbildung 14) zeigt sich ein ähnliches Bild wie schon bei den anderen Übungen. TR zeigt die höchsten Werte bis über 167% des Vergleichswertes bei 25% der Probanden. SCM liegt mit

Werten von bis zu 125% im oberen Quartil auch auf einem sehr hohen Beanspruchungsniveau. Beide zeigen im Vergleich zu den anderen Muskeln eine viel größere Streubreite. Die niedrigsten Werte im Vergleich zu den Referenzen zeigen SA und ICO5, obwohl ICO5 nach OI zu den Muskeln mit der höchsten absoluten Aktivierung gehört (Abbildung 13).

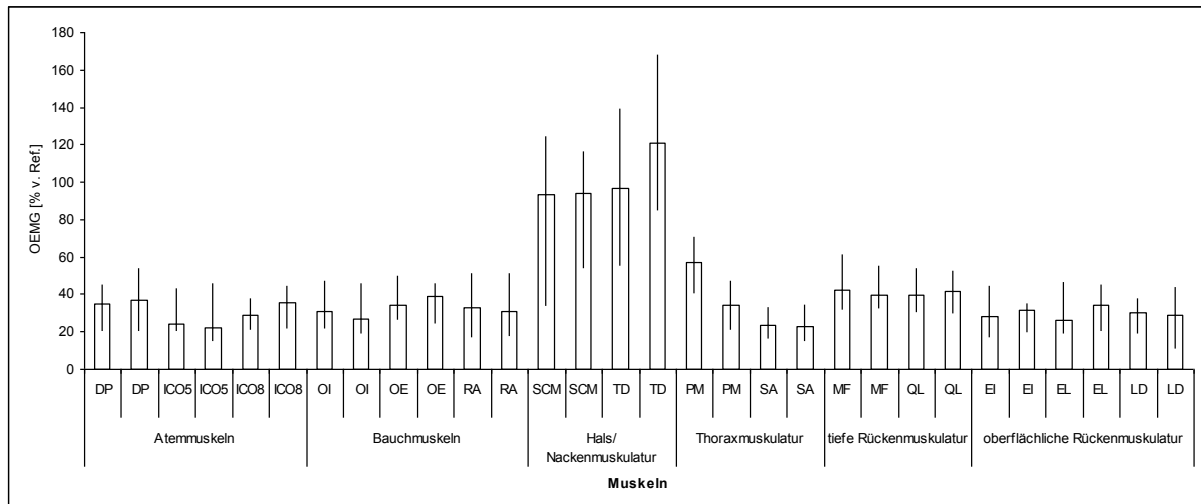


Abbildung 14 Endton Tonleiter: Muskelaktivierung im Vergleich zur Referenz

Dargestellt ist der Median der prozentualen Muskelaktivitäten der einzelnen Muskeln im Endtonbereich der Tonleiter im Vergleich zum Referenzmaximum mit oberem und unterem Quartil

4.1.3.1.3 Intermuskuläre Koordination

Wie bei den Endbereichen der schon betrachteten Übungen trägt auch beim Endton der Tonleiter OI den größten Anteil an der Gesamtaktivität der Muskulatur. Aber auch hier zeigt sich wieder ein sehr hohes Streuungsmaß zwischen den einzelnen Probanden (Abbildung 15). Den geringsten Anteil haben RA und PM. Die anderen Muskeln halten alle einen Anteil von 1,6% bis 4,1% wobei die Atemmuskeln noch die höchsten anteiligen Aktivitäten zeigen (2,7% bis 4,1%). Somit ergibt sich ein ähnliches Aktivitätsmuster wie in den Endbereichen der anderen Übungen. Würde eine Gleichverteilung der muskulären Aktivitätsanteile vorliegen, müssten alle Muskeln einen Aktivitätsanteil von 3,33% tragen.

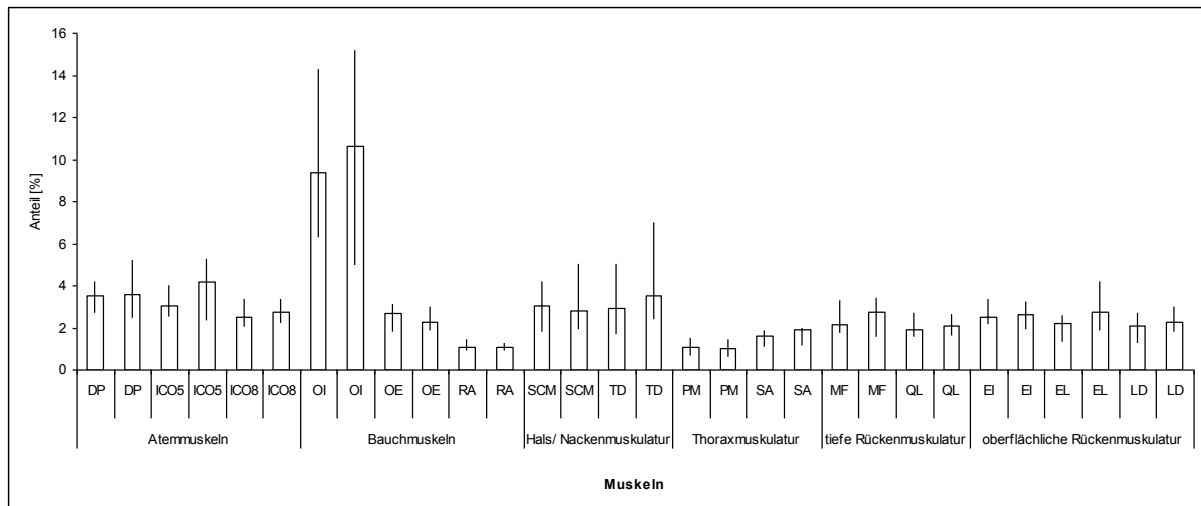


Abbildung 15 Endton Tonleiter: intermuskuläre Koordination

Dargestellt ist der Median der prozentualen Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität mit oberem und unterem Quartil

4.1.3.2 Geschlechtsspezifische Unterschiede verschiedener Parameter

4.1.3.2.1 muskuläre Aktivität relativ zur Referenz

Betrachtet man die relativen Aktivitäten im Vergleich zur Referenzmessung, zeigt sich wieder, dass die weiblichen Probanden bis auf SCM ein höheres Beanspruchungsniveau für alle Muskeln aufzeigen. Signifikant höhere Aktivitäten sind aber nur für die tiefe Rückenmuskulatur, Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur und rechtsseitig für DP zu verzeichnen. Insgesamt ist wieder eine leichte Tendenz zu Gunsten der rechten Seite zu beobachten.

Tabelle 8 Endton Tonleiter: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln für den Endtonbereich der Tonleiter

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

links	Muskeln	rechts
	DP	
	ICO5	
	ICO8	
	OI	
	OE	
	RA	
	SCM	
	TD	
	PM	
	SA	
	MF	
	QL	
	EI	
	EL	
	LD	

4.1.3.2.2 Intermuskuläre Koordination

Für die anteiligen Muskelaktivitäten sind es wieder OI, MF, Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur, TD und DP, die bei den Männern größere Anteile an der Gesamtaktivität tragen, jedoch wiederum nicht signifikant. OE auf der linken Seite wird bei den weiblichen Probanden zu einem signifikant höheren Anteil in die Gesamtaktivität eingebunden als bei den männlichen.

Tabelle 9 Endton Tonleiter: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln für den Endtonbereich der Tonleiter

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

links	Muskeln	rechts
	DP	
	ICO5	
	ICO8	
	OI	
	OE	
	RA	
	SCM	
	TD	
	PM	
	SA	
	MF	
	QL	
	EI	
	EL	
	LD	

4.1.4 Schwellton

4.1.4.1 Muskelaktivitäten über die drei Schwelltonbereiche

4.1.4.1.1 mittlere Muskelaktivitäten über die drei Bereiche

Wie nicht anders zu erwarten, ist auch beim Schwellton OI der Muskel mit der höchsten Aktivität (Abbildung 16). Er erreicht im Endbereich des Schwelltons sogar Werte von über 95 μV . Es ist allerdings eine deutliche Seitendifferenz zwischen rechtem und linkem Anteil zu sehen, wiederum mit Dominanz der rechten Seite. Die anderen Muskeln zeigen bis auf SCM ebenfalls einen konstanten Anstieg der Aktivität, jedoch bei niedrigeren Aktivitätswerten bis max. 40 μV .

SCM steigt in seiner Aktivität bis zum Erreichen der maximalen Tonintensität erst an, um dann zum Ende der Übung hin wieder abzufallen. Dieser für SCM beschriebene anfängliche Anstieg der Aktivität mit darauf folgendem Abfall ist aber nur auf der rechten Seite signifikant (Abbildung 17). Auch MF zeigt ein sich von den übrigen Muskeln unterscheidendes Verhalten. Nach dem anfänglichen Anstieg zum Intensitätsmaximum bleibt er in seiner Aktivität konstant.

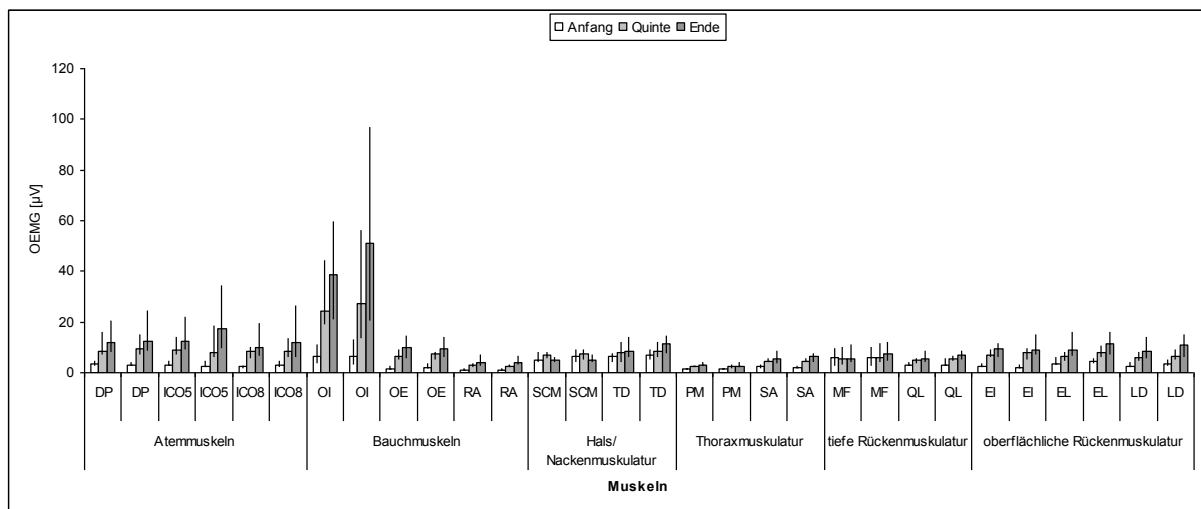


Abbildung 16 Schwellton: mittlere Muskelaktivitäten

Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte der einzelnen Muskeln über die drei Schwelltonbereiche mit oberem und unterem Quartil

Die Aktivitätssteigerungen besonders vom Anfangsbereich bis zum Bereich maximaler Intensität sind bei allen Muskeln bis auf MF signifikant. Jedoch ist nicht für alle Muskeln

eine Aktivitätssteigerung bis zum Ende der Übung charakteristisch. Eine eher konstante Aktivierung zeigt MF, während bei SCM am Ende ein Aktivitätsabfall beobachtet wird.

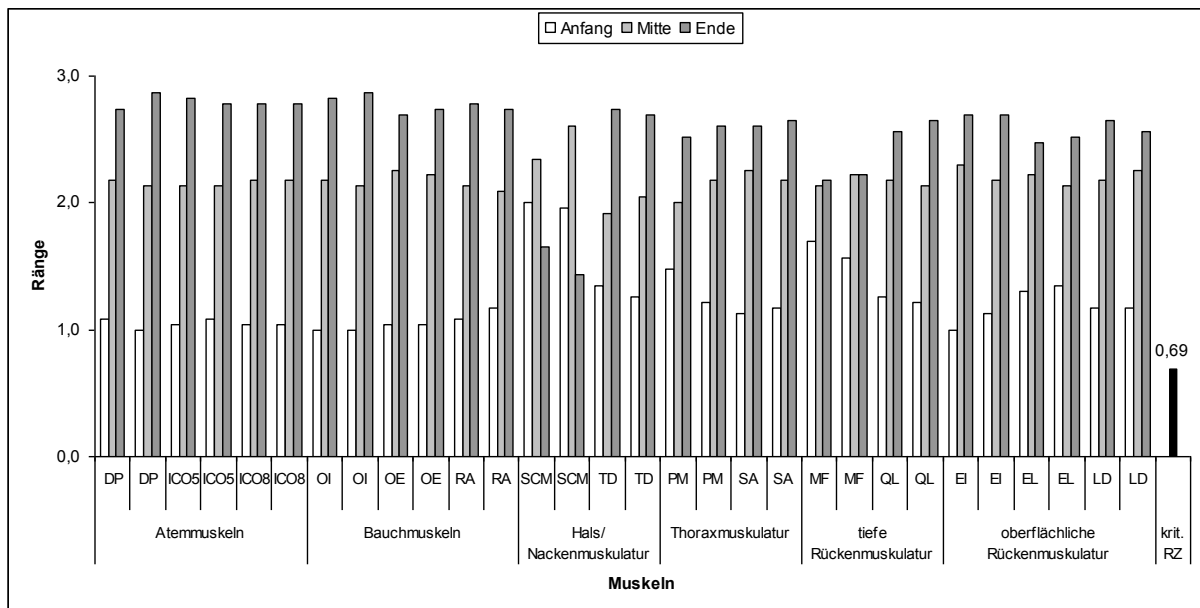


Abbildung 17 Schwellton: Mittlere Rangzahlen nach Friedman (Absolutwerte)

Dargestellt sind die mittleren Rangzahlen der Absolutmittelwerte der einzelnen Muskeln über die drei Schwelltonbereiche und die kritische Rangzahldifferenz (0,69) als schwarzer Balken am Rand der Abbildung

4.1.4.1.2 Relativer Verlauf der Muskelaktivitäten in Bezug auf das Referenzmaximum

Schon beim ersten Blick auf die Skalierung (Abbildung 18) ist zu erkennen, dass bei allen Muskeln für die Schwelltonübung ein sehr hohes Anstrengungsmaß im Vergleich zur Referenzmessung erreicht wird. Wiederum ist es TD, der die höchsten Werte im Vergleich zur Referenz erreicht. So sind bei einem Median von 158% rechts sogar bei 25% der Probanden Maximalwerte von über 234% am Ende des Schwelltons zu erkennen. Auch hier nimmt SCM wieder den zweiten Platz ein, wobei seine höchsten Werte im Vergleich zur Referenz nicht mehr wie bei den anderen Übungen zu Beginn, sondern in der Mitte der Übung generiert wurden.

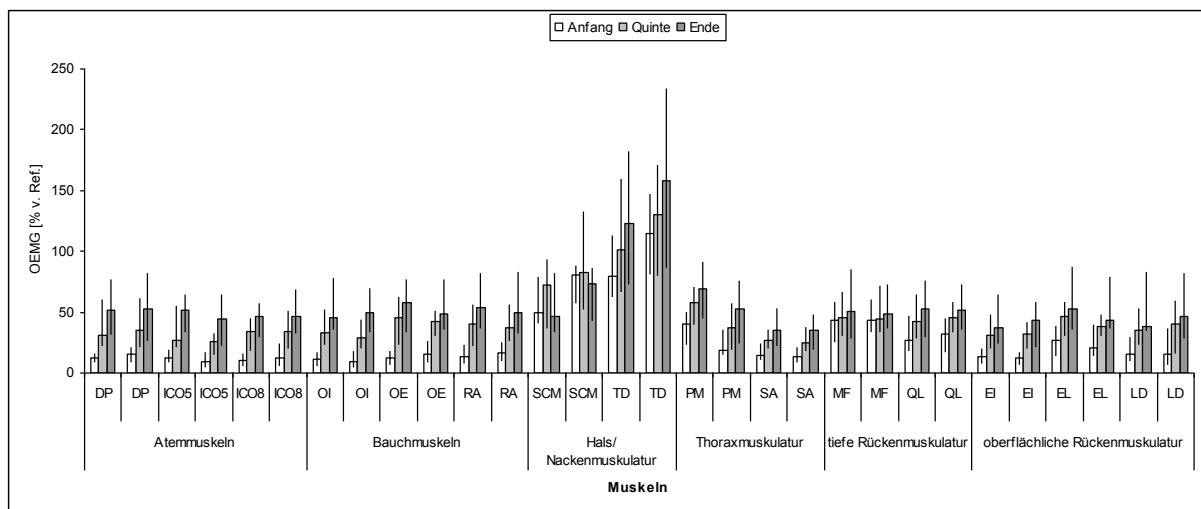


Abbildung 18 Schwellton: Muskelaktivierung im Vergleich zur Referenz

Dargestellt ist der Median der prozentualen Muskelaktivitäten der einzelnen Muskeln über die drei Schwelltonbereiche im Vergleich zum Referenzmaximum mit oberem und unterem Quartil

4.1.4.1.3 Intermuskuläre Koordination

Bezogen auf die gesamte Muskelaktivität trägt auch beim Schwellton wieder OI den höchsten Anteil (Abbildung 19). Alle anderen Muskeln zeigen einen ähnlichen Verlauf wie beim Vokalausgleich, wiederum unterteilt in verschiedene Gruppen: Eine erste Gruppe von Muskeln steigert ihren Aktivitätsanteil. Dazu gehören ein Großteil der Bauchmuskulatur (RA, OI) und die Atemmuskulatur (ICO5, ICO8, DP). Eine weitere Gruppe zeigt einen im Verlauf abfallenden (QL, MF, EL und SCM) und eine dritte Gruppe (SA, LD) einen eher gleichbleibenden Aktivitätsanteil. Eine weitere, beim Vokalausgleich noch nicht auffällige Gruppe (OE, EI), zeigt einen erst ansteigenden und dann abfallenden Aktivierungsanteil (Abbildung 19).

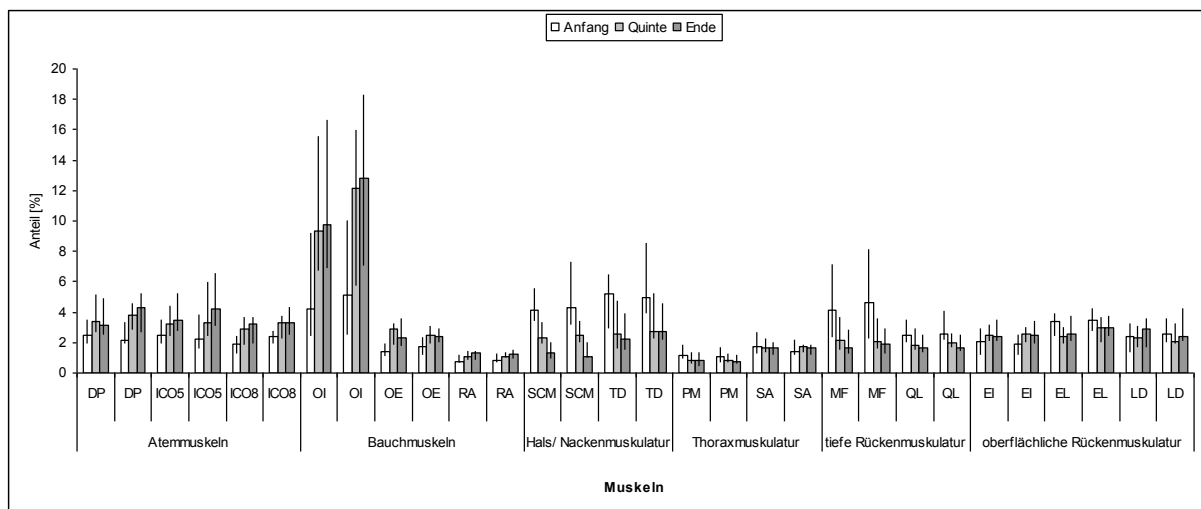


Abbildung 19 Schwellton: intermuskuläre Koordination

Dargestellt ist der Median der prozentualen Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität mit oberem und unterem Quartil

Betrachtet man nun auch die Rangzahlenverlaufsanalyse nach Friedman (Abbildung 20), stellt man fest, dass besonders bei den Muskeln mit abfallenden Aktivitätsanteilen die Signifikanzen dieser Verläufe am deutlichsten sind. Dies betrifft besonders die tiefe Rückenmuskulatur (QL, MF), Teile der oberflächlichen Rücken- (EL) und der Thoraxmuskulatur (PM) sowie die Nacken-/ Halsmuskulatur (SCM, TR). Bei der Bauchmuskulatur (RA, OI, OE) und der Atemmuskulatur (ICO8, DP), welche ansteigende Aktivitätsanteile zeigen, ist oft der Unterschied zwischen dem Anfangsbereich und dem Bereich maximaler Intensität signifikant. Keine signifikanten Änderungen im Rangzahlverlauf ergeben sich für große Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EI I, LD, EL r), SA und ICO5.

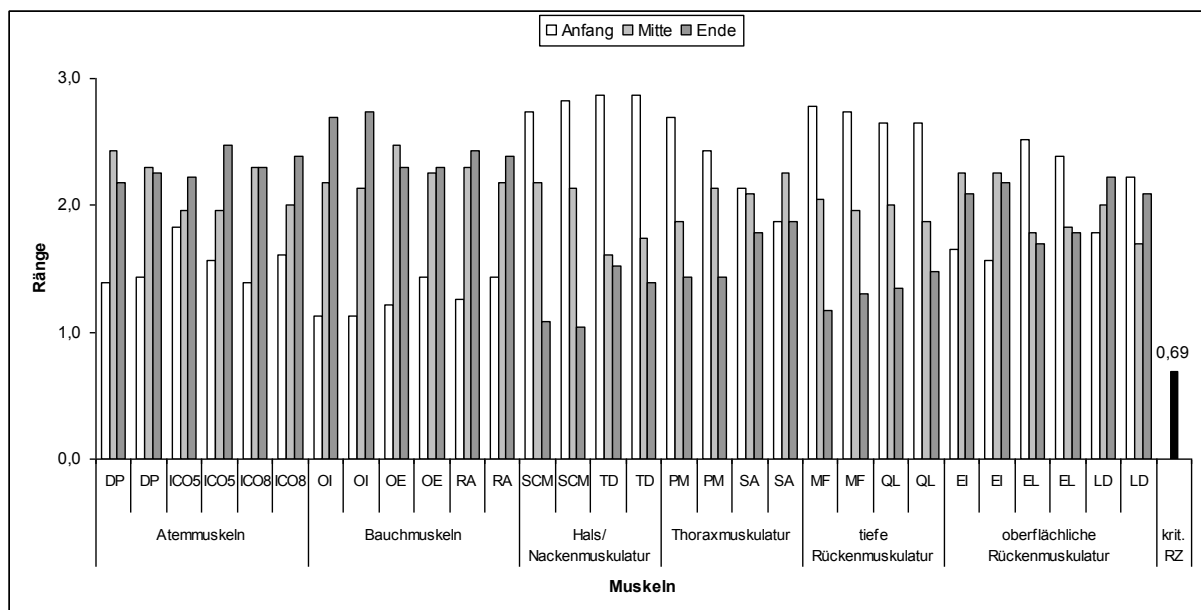


Abbildung 20 Schwellton: mittlere Rangzahlen nach Friedman (intermuskulär)

Dargestellt sind die mittleren Rangzahlen der einzelnen Muskeln über drei Schwelltonbereiche und die kritische Rangzahldifferenz (0,69) als Orientierungsbalken an der Seite.

4.1.4.2 Geschlechtsspezifische Unterschiede für verschiedene Bezugsparameter

4.1.4.2.1 Muskuläre Aktivität relativ zur Referenz

Beim Vergleich des Anspannungsniveaus der einzelnen Muskeln im Bezug zum Referenzmaximum (Tabelle 10) bei männlichen und weiblichen Probanden fällt wie schon bei den bis jetzt betrachteten Übungen auf, dass es wieder die Frauen sind, welche in Relation zur Referenzmessung höhere Aktivierungen aufweisen.

Signifikante Unterschiede zu den männlichen Probanden sind dabei vor allem für die tiefe und oberflächliche Rückenmuskulatur und SA zu verzeichnen - besonders während des Zeitraumes der maximalen Tonintensität und am Ende des Schwelltons. Bei Teilen der Atemmuskulatur werden signifikante Unterschiede hingegen schon am Anfang und im Bereich der maximalen Intensität nachgewiesen.

Nur bei SCM und PM sind für einzelne Zeitpunkte bei den Männern tendenziell höhere Aktivierungen im Vergleich zu den Frauen zu verzeichnen.

Tabelle 10 Schwellton: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Withney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden Schwelltonbereich

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Anfang	Mitte	Ende	Schwelltonbereich	Anfang	Mitte	Ende
Links			Muskeln	Rechts		
			DP			
			ICO5			
			ICO8			
			OI			
			OE			
			RA			
			SCM			
			TD			
			PM			
			SA			
			MF			
			QL			
			EI			
			EL			
			LD			

4.1.4.2.2 Intermuskuläre Koordination

Die intermuskuläre Koordination vergleichend (Tabelle 11), fällt wie schon bei den anderen Übungen auf, dass es bestimmte Muskeln gibt, welche bei den Männern anteilig höhere Aktivierungswerte haben und solche, bei denen dies für die Frauen gilt. Wieder sind es OI, QL, MF, EL, SA, SCM, TD, ICO8 und DP für die Männer. Wobei auch beim Schwellton ein Überwiegen der rechten Seite bei einigen dieser Muskeln (EL, TD) während der gesamten Übung zu sehen ist, bei anderen (RA, ICO8, DP) erst gegen Ende des Schwelltons. Signifikant sind aber nur die höheren anteiligen Aktivitätswerte für OE im Bereich der maximalen Tonintensität und am Ende des Schwelltons für die weiblichen Probanden.

Tabelle 11 Schwellton: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln für den Endtonbereich der Tonleiter

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Anfang	Mitte	Ende	Schwelltonbereich	Anfang	Mitte	Ende
Links			Muskeln	Rechts		
			DP			
			ICO5			
			ICO8			
			OI			
			OE			
			RA			
			SCM			
			TD			
			PM			
			SA			
			MF			
			QL			
			EI			
			EL			
			LD			

4.2 Dynamische Betrachtungen

4.2.1 Inspiration

Im folgenden Kapitel soll dargestellt werden, wie die Einatemphase zum Zeitpunkt des Studienbeginnes der Probanden muskulär organisiert ist und wie sich parallel zu dieser muskulären Organisation die Dehnungen der Atembänder verhalten.

4.2.1.1 Reliabilitätsanalyse

Als erstes wurde für die Einatemsituationen der vier Gesangsübungen eine Reliabilitätsanalyse durchgeführt, um zu prüfen, ob diese untereinander vergleichbar und reproduzierbar sind. Diese Reliabilitätsanalyse wurde sowohl für die Auslenkungswerte der drei Atembänder als auch für die Aktivitäten der einzelnen Muskeln durchgeführt. Für die Muskulatur wurde dies durch die Bildung des Intra-Class-Korrelationskoeffizienten für die Absolutwerte, die anteiligen Muskelaktivitäten an der intramuskulären Koordination und den Referenzwert in Bezug zum übungsspezifischen Maximum einzeln für jeden Muskel und über die zehn Betrachtungszeiträume erreicht. Bei den drei Atembändern wurden nur die relativen Auslenkungswerte verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 34. im Anhang dargestellt.

4.2.1.1.1 Reliabilität Bänderauslenkungen

Für die drei Atembänder ergaben sich hinsichtlich der Reliabilität ihrer relativen Auslenkungswerte unterschiedliche Ergebnisse. Band 1 im Bereich des oberen Thorax zeigt über die gesamte Einatemphase hinweg ausnahmslos eine sehr gute Reliabilität mit Koeffizienten von über 0,9. Bei Band 2 im Bereich der Flanken zeigt sich ein anderes Bild hinsichtlich der Reliabilität. Bis auf den 4. und 5. Betrachtungszeitraum zeigt es gute Werte von über 0,7. In den erwähnten beiden Zeitbereichen ist allerdings keine ausreichende Reliabilität bezüglich der Bänderauslenkungen des Bands 2 gegeben. Für Band 3 um den Bauch zeigen sich wieder bessere Reliabilitätswerte über die gesamte Einatemphase hinweg. In den ersten und letzten drei Betrachtungszeiträumen

sind sie sehr gut mit Koeffizienten von über 0,9, die restlichen vier Bereiche zeigen aber auch noch gute Werte mit Koeffizienten $>0,8$.

4.2.1.1.2 Reliabilität Muskulatur

Für Absolutwerte der Muskelaktivitätsmessungen ergab sich ausnahmslos eine gute bis sehr gute Reliabilität mit einem Koeffizienten von $>0,7$ bzw. $>0,9$. Am besten war sie für die obere Thoraxmuskulatur (TD, SA, PM) und RA. Am geringsten waren sie für ICO8 r, EI r/l und SCM l. Auch für die intermuskuläre Koordination war insgesamt eine sehr gute Reliabilität zu verzeichnen. Lediglich gute Koeffizienten zeigten EI l, SCM l, QL r, SA r und TD r (Tabelle 34).

Die Vergleichbarkeit der Muskelaktivierungen bezogen auf das übungsspezifische Maximum lag mit einem Koeffizienten von $>0,7$ im guten Bereich und für OI l, EI l/r, EL l, SA l/r, TD l, ICO8 l, DP l und SCM r bei nur wenigen Betrachtungszeitpunkten darunter. Mit den beschriebenen Ergebnissen der Reliabilitätsanalysen ist sichergestellt, dass die gemessenen Einatemphasen der vier Übungen untereinander vergleichbar und reproduzierbar sind. Damit ist es im Folgenden ausreichend, die Ergebnisse der statistischen Betrachtungen der Einatemphase an einer der vier Übungen exemplarisch für die anderen darzustellen.

4.2.1.2 Die Inspiration am Beispiel der Schwellton-Übung

Da, wie unter 4.2.1.1 beschrieben, die Einatemsituationen der vier Gesangsübungen ausreichend reliabel sind, werden die Ergebnisse für diese Situationen am Beispiel der Einatemphase der Schwelltonübung dargestellt.

Zur vereinfachenden Darstellung der Vielzahl an Muskeln werden diese im Folgenden in die in der Einleitung erörterten Muskelgruppen zusammengefasst.

4.2.1.2.1 Bandauslenkungen

Betrachtet man die Auslenkungen der einzelnen dehnbaren Bänder um Brust, Flanken und Bauch (Abbildung 21), zeigt sich, wie nicht anders für die Einatmung zu erwarten, eine Zunahme des Umfangs aller Bänder. Dabei fällt auf, dass die beiden Bänder um Flanken und Bauch die größte Ausdehnung erfahren. Die Maximaldehnung wird allerdings nicht, wie vielleicht zu erwarten gewesen wäre, am Ende der Einatmung sondern bereits bei ca. 75% der Zeit der Einatemphase erreicht. Nur das Brustband zeigt eine konstante Dehnung bis zum Ende der Einatemphase hin, erreicht dabei aber nicht die maximalen Auslenkungswerte der beiden anderen Bänder. Dieses Bild wird durch die statistische Verlaufsanalyse bestätigt. Band 2 und 3 zeigen eine signifikante Umfangszunahme bis 80% der Übungszeit, um dann in ihrer Dehnung bis zum Ende der Einatemphase wieder nachzulassen. Dieser Dehnungsverlust ist allerdings nicht signifikant, da bei den gegebenen Randbedingungen für die statistischen Berechnungen Rangzahlunterschiede von 2,82 für den entsprechenden Nachweis erreicht werden müssen. Die für den Dehnungsverlust zu berücksichtigenden Differenzen betragen aber lediglich ca. 2 Rangzahlpunkte.

Nur Band 1 zeigt wie schon beschrieben eine signifikante und unterbrechungsfreie Dehnungszunahme bis zum Ende der Einatmung.

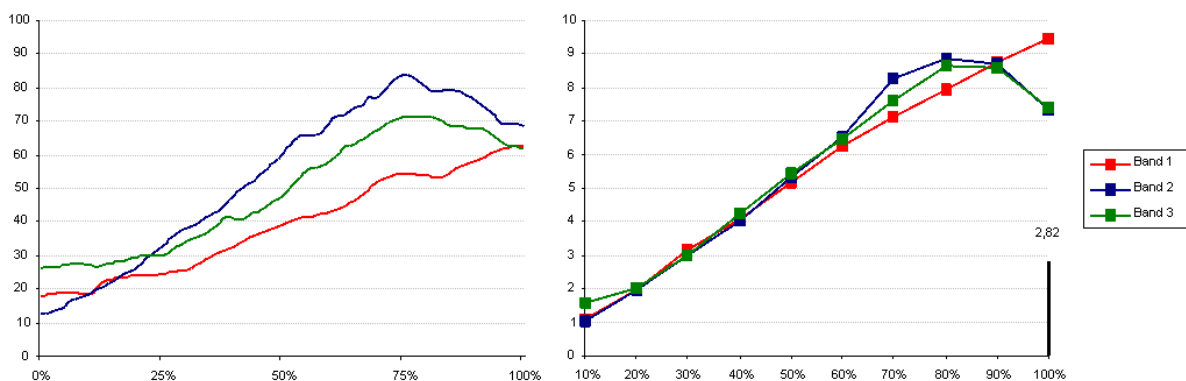


Abbildung 21 Einatmen: Bandauslenkungen

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der relativen Bandauslenkungen in % für die drei Bänder über den normierten Einatemzyklus

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die drei Bänder über die 10 Zeitabschnitte der Einatemphase und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.1.2.2 Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über die Einatemphase

Da die Aktivitätsverläufe der linken und rechten Körperhälfte prinzipiell das gleiche Aktivitätsverhalten zeigen, beschränken sich die folgenden Beschreibungen der Muskelaktivitäten für alle beschriebenen Muskeln auf die der linken Körperhälfte. Wichtige Unterschiede zwischen linker und rechter Muskulatur werden im Text erwähnt und die Daten sowohl der linken und auch der rechten Muskulatur sind der Vollständigkeit halber im Anhang aufgeführt. Tabelle 35 bis Tabelle 50 zeigen jeweils die mittleren Rangzahlen der Mediane der Absolutwerte nach Friedman der einzelnen Muskeln über die zehn Betrachtungsbereiche.

Alle folgenden Beschreibungen beziehen sich auf Abbildung 22, wobei die beschriebenen medianen Aktivitätskurven links und die Rangzahlenverläufe rechts dargestellt sind.

4.2.1.2.2.1 Atemmuskulatur

Alle Atemmuskeln zeigen einen ähnlichen medianen Aktivitätsverlauf, der sich nur im Aktivitätsniveau am Anfang der Einatmung unterscheidet. ICO5 beginnt dabei auf dem höchsten Niveau, gefolgt von DP und ICO8. Insgesamt zeigt sich ein phasischer Aktivitätsverlauf mit einem Aktivitätsabfall bis 30/40% der Einatmung, gefolgt von einem signifikanten Aktivitätsanstieg bis 70/80%, wiederum abgelöst von einem Aktivitätsabfall zum Ende der Einatmung hin. Dieser Aktivitätsabfall am Ende ist bei der Atemmuskulatur so stark ausgeprägt, dass er für ICO5 und ICO8 Signifikanz erreicht. Dieser Aktivitätsverlauf lässt sich sehr gut in den Bandauslenkungskurven der beiden Bänder um Flanke und Bauch nachvollziehen.

4.2.1.2.2.2 Bauchmuskulatur

Betrachtet man die Aktivitätsverläufe der einzelnen Bauchmuskeln, so scheint es, als ob OE und RA ein relativ konstantes Aktivitätsverhalten über das Einatmen hinweg zeigen, wohingegen OI von einem wesentlich höheren Aktivitätslevel startend, deutlich abfällt, um dann gegen Ende des Einatmens wieder leicht anzusteigen. Bei der Analyse der

Rangzahlverläufe bestätigt sich dieses Bild mit einem signifikanten Aktivitätsabfall für OI vom Anfang des Einatmens bis zum Bereich von 80% bzw. 90%. Damit ist er der einzige der untersuchten Muskeln, welcher während der Inspiration in seiner Aktivität so deutlich abfällt. Sein Aktivitätsanstieg zum Ende erreicht keine Signifikanz. Die beiden anderen Bauchmuskeln, die ein scheinbar gleich bleibendes Aktivitätsniveau aufwiesen, zeigen bei der Betrachtung der Rangzahlverläufe ein deutlich biphasisches Verhalten, ähnlich dem der Atemmuskulatur. Wie bei dieser zeigt sich auch hier ein Aktivitätsabfall vom Beginn bis zum Bereich von 30-50% der Einatemphase und ein sich daran anschließender Aktivitätsanstieg bis 70-90% der Einatemzeit, wobei sich der Aktivitätshöhepunkt am Ende mit seiner Rangzahl etwa auf demselben Level befindet wie der Aktivitätswert zum Beginn der Übung. Danach fallen die Aktivitäten bei diesen beiden Muskeln wieder ab. Anhand der dargestellten kritischen Rangzahldifferenz ist ersichtlich, dass diese Aktivitätsunterschiede zwischen den Maxima und den Minima auch signifikant sind.

4.2.1.2.2.3 Hals-/Nackenmuskulatur

Einen auffällig anderen Verlauf im Vergleich zu den bisher betrachteten Muskeln zeigt die Hals-/Nackenmuskulatur. So zeigt TD einen fast konstanten Aktivitätsverlauf auf einem hohen Aktivierungsniveau, während SCM in seiner Aktivität über das Einatmen hinweg leicht ansteigt. Bei der Analyse der Rangzahlenverläufe bestätigt sich für TD das Bild der sich nicht ändernden Aktivität über die Inspirationsphase. Für SCM hingegen spiegeln die Rangzahlen einen signifikanten kontinuierlichen Aktivitätsanstieg bis zu 90% der Einatemphase wieder. Zu bemerken ist, dass dieser Maximalwert für SCM auf der rechten Seite erst am Ende (100%) der Einatmung erzeugt wird. Hier spiegelt sich der Aktivitätsverlauf von SCM in der Bandauslenkungskurve des Atembandes um den Thorax

4.2.1.2.2.4 Thoraxmuskulatur

Für die obere Thoraxmuskulatur ist, wie schon bei Atem- und Bauchmuskulatur, erst ein leichter Aktivitätsabfall zu beobachten, bevor es für beide Muskeln einen Aktivitätsanstieg gibt. Signifikant ist nur der Anstieg bis zu den jeweiligen

Maximalwerten für SA und PM, welche im Gegensatz zu den anderen betrachteten Muskelgruppen schon bei 70% der Einatmung liegen. Der sich an die Maximalwerte anschließende Aktivitätsabfall ist auch bei den Rangzahlverläufen zu sehen, erreicht aber keine Signifikanz.

4.2.1.2.2.5 tiefe Rückenmuskulatur

Für die tiefe Rückenmuskulatur zeigt sich folgendes Bild: Beide Muskeln scheinen in ihrer Aktivität kontinuierlich anzusteigen, wobei dies für MF im Vergleich zu QL auf einem höheren Level stattfindet. Bei der Betrachtung der Rangzahlen zeigt sich für beide ein ähnlicher Verlauf, wie er schon für einen Teil der Bauchmuskulatur zu bemerken war. Startend von einem niedrigen Aktivitätslevel erfolgt zuerst ein leichter Aktivitätsabfall vor einem kontinuierlichen Anstieg bis 80 bzw. 90% der Einatmung. Danach ist wieder ein Aktivitätsabfall festzustellen. Signifikant ist jedoch nur, wie an der kritischen Rangzahldifferenz abzulesen, der Aktivitätsanstieg.

4.2.1.2.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Die oberflächliche Rückenmuskulatur zeigt sowohl für die Medianwerte als auch bei den Rangzahlverläufen einen ähnlichen Aktivitätsverlauf, wie er schon für die tiefe Rückenmuskulatur zu beobachten war. Alle zeigen einen Aktivitätsabfall zu Beginn der Einatmung. Bei EI und LD ist dieser am stärksten ausgeprägt, jedoch nicht signifikant. Anschließend zeigen alle drei Muskeln einen signifikanten Anstieg in ihren Muskelaktivitäten wobei EI und LD ihre Maximalwerte bei 80% der Einatmung erreichen - EL erst bei 90%. Alle Muskeln zeigen am Ende einen Aktivitätsabfall, der bei EI am deutlichsten, jedoch statistisch nicht signifikant ist.

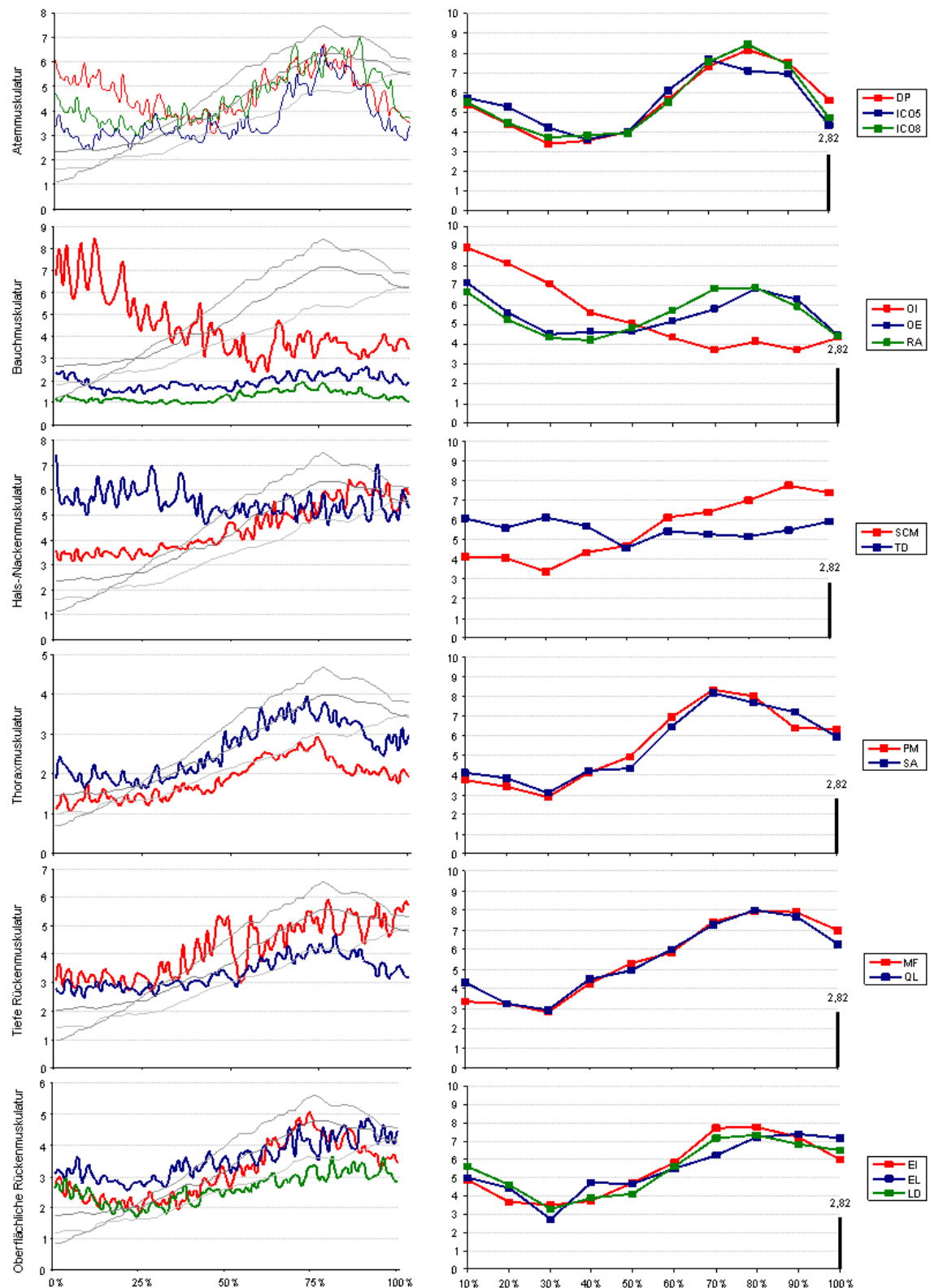


Abbildung 22 Einatemphase

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der mittleren Muskelaktivitäten in μV für die einzelnen Muskelgruppen über die Einatemphase in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund grau dargestellt die Bandauslenkungen
 Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die einzelnen Muskelgruppen über die 10 Zeitabschnitte der Einatemphase und die kritische Rangzahlendifferenz (2,82) als schwarzer Balken zur Orientierung

4.2.1.2.3 Geschlechtsspezifische Unterschiede

Wie schon bei der Analyse der statischen Daten wurden auch bei den dynamischen Daten der Einatmung Vergleiche zwischen männlichen und weiblichen Probanden mithilfe des Mann-Whitney-U-Tests durchgeführt. Auch bei den dynamischen Daten dienten die schon bei den statischen Daten benutzten Parameter als Normierungshilfen für den Vergleich der Muskelaktivitäten. Zusätzlich zu diesen kam bei den dynamischen Daten auch noch das Übungsspezifische Maximum als Bezugsparameter hinzu (siehe 3.4.3).

4.2.1.2.3.1 Bandauslenkungen

Bei der Analyse auf Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden bezüglich der Bandauslenkungen (Tabelle 12) fallen nur für Band 3 in den ersten drei Bereichen signifikante Unterschiede auf. In diesen Bereichen sind es die Männer, welche signifikant größere Bandauslenkungen zeigen. Neben diesen signifikanten Unterschieden ist allgemein auffällig, dass häufiger bei den Männern weitere Bandauslenkungen beobachtet werden und dies besonders für das Band 1 über die gesamte Einatemphase und das Band 3 besonders in der ersten Hälfte der Einatmung. Im ersten Drittel ist diese weitere Ausdehnung wie schon erwähnt auch signifikant.

Tabelle 12 Einatmung: Geschlechtsvergleich relativer Bandauslenkungen

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Bandauslenkungen in den 10 Zeitabschnitten über die Einatemphase

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die größeren relativen Bandauslenkungen im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Zeitabschnitte, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben größere relative Bandauslenkungen

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen größeren relativen Bandauslenkungen

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Relativer Bereich Einatmung	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Band 1										
Band 2										
Band 3										

4.2.1.2.3.2 Muskulatur

Für den Vergleich zwischen Männern und Frauen bezüglich der Muskelaktivierungen wurden die unter 3.4.3 besprochenen Parameter als Normierungshilfen benutzt.

Betrachtet man die muskulären Aktivitäten über die Einatemphase in Bezug auf das übungsspezifische Maximum (Tabelle 13), also den jeweiligen maximalen Aktivierungswert eines jeden Muskels im Verlauf der Einatemphase, zeigt sich folgendes Bild:

Zum Beginn der Einatemphase sind es die Frauen, welche höhere Werte im Vergleich zum jeweiligen Maximalwert der einzelnen Muskeln während der Einatemphase generieren. Zum Ende hin zeigen die Männer höhere Werte. Signifikant sind diese Unterschiede nur für rechts MF und ICO5 bei Männern bzw. rechts OE und links ICO8 bei Frauen.

Tabelle 13 Einatmen: Geschlechtsvergleich in Bezug auf das übungsspezifische Maximum

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der Muskelaktivierungen im Vergleich zum übungsspezifischen Maximum von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Einatemphase

Dargestellt sind hell farblich hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und dunkel farblich hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschieden signifikant sind
Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil
Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil
Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Einatmun	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Bei der muskulären Aktivierung im Vergleich zum Referenzmaximum zeigt sich ein anderes Bild (Tabelle 14). Hier sind es bis auf wenige Ausnahmen immer die Frauen, welche höhere relative Aktivierungen im Vergleich zur Referenzmessung zeigen. Signifikant ist dies vor allem für die linke oberflächliche Rückenmuskulatur fast über die

ganze Einatemphase hinweg. Aber auch die rechtsseitige oberflächliche Rückenmuskulatur zeigt signifikante Unterschiede über längere Zeitabschnitte. Jeweils zu frühen Zeitabschnitten während der Einatmung sind auch die Unterschiede bei QL, OE und Teilen der Atemmuskulatur (ICO8 und DP) zugunsten der Frauen signifikant. Die männlichen Probanden zeigen bei einigen Zeitpunkten für SCM und kurze Betrachtungsbereiche für OI, OE, PM und TD tendenziell höhere Aktivierungsniveaus im Vergleich zur Referenzmessung, jedoch ohne Signifikanz.

Tabelle 14 Einatmen: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Einatemphase.

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Einatmun	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Beim Vergleich der intermuskulären Koordination beider Geschlechter (Tabelle 15) fällt auf, dass im Median die Männer eine höhere anteilige Aktivierung bei der tiefen Rückenmuskulatur, Teilen der Atemmuskulatur (ICO8, DP) und der Halsmuskulatur (TD) aufweisen. Zusätzlich gibt es einige Muskeln, die eher am Anfang (OI, EL, LD) oder eher am Ende (RA, OE, SA) bei den männlichen Probanden höhere relative Anteile an der Gesamtaktivität haben. Signifikant ist dieser Unterschied für die Männer jedoch nur für EI auf der rechten Seite in einem einzelnen Zeitabschnitt. Bei den weiblichen Probanden, die vor allem bei der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EI links, EL, LD) der Halsmuskulatur (SCM) und Teilen der Thoraxmuskulatur (PM) über die gesamte Einatemphase hinweg die höheren relativen Aktivierungsanteile zeigen,

gibt es auch Muskeln, die eher am Anfang (RA, SA, ICO8, DP) oder eher am Ende (OI) dominieren. Insgesamt sind es für die weiblichen Probanden mehr Muskeln und Zeitpunkte, bei denen der Unterschied zu den Männern signifikant ist. Besonders fällt dabei OE in den ersten beiden Zeitintervallen auf.

Tabelle 15 Einatmen: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Einatemphase

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren anteiligen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Einatmun	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

4.2.2 Übungen

Im Folgenden werden die vier Gesangsübungen nacheinander nach den gleichen Gesichtspunkten analysiert, wie dies im vorherigen Kapitel für die Einatemphase getan wurde. Da sich die Übungen in ihren Verlaufscharakteristiken bezüglich der Muskelaktivitäten aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit in der Ausführung stark voneinander unterscheiden, erübrigt sich ein Test auf Reliabilität an dieser Stelle.

4.2.2.1 Vokalausgleich

4.2.2.1.1 Bandauslenkungen

In der ersten Gesangsübung zeigt sich für die Verläufe der Bänderdehnungen folgendes Bild. Band 2 startet bei einer Dehnung von 70% im Median und verliert kontinuierlich über den Vokalausgleich hinweg an Umfang. Kurz vor Ende der Übung erreicht es sogar negative relative Werte bezogen auf die Kalibrierungsmessung der Bänder. Band 1 und 3 haben zum Beginn der Übung eine annähernd gleiche Dehnung zwischen ca. 60 und 65%. Band 3 zeigt aber nach einem kurzen Dehnungsverlust noch einmal eine kurzzeitige Umfangszunahme, um dann kontinuierlich bis zum Ende hin an Umfang zu verlieren. Bei Band 1 ist der Umfangsverlust vom Anfang bis zum Ende kontinuierlich. Kurz vor Ende des Vokalausgleiches erreicht es ebenso wie Band 2 seinen niedrigsten Wert, nimmt allerdings ganz am Ende wieder geringfügig an Umfang zu. Aufgrund der Unterteilung in nur 10 Betrachtungszeiträume, über welche die Dehnungswerte gemittelt wurden, fällt dies bei der Betrachtung der Rangzahlverläufe aber nicht ins Gewicht. Hier zeigt sich für alle drei Bänder ein signifikanter Umfangsverlust über die gesamte Gesangsübung hinweg. Für Band 3 ist der Verlauf der geordneten Rangzahlen aber weniger systematisch als bei den anderen beiden Bändern (Abbildung 23).

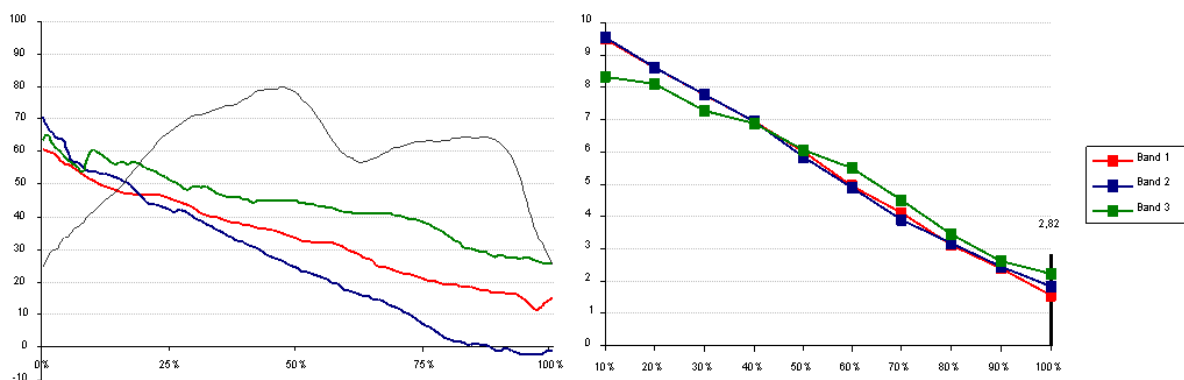


Abbildung 23 Vokalausgleich: Bandauslenkungen

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der relativen Bandauslenkungen in % für die drei Bänder über den Vokalausgleich in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund schwarz dargestellt das Tonsignal (zur besseren Ablesbarkeit normiert auf das übungsspezifische Maximum)

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die drei Bänder über die 10 Zeitabschnitte des Vokalausgleichs und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.1.2 Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über den Vokalausgleich

Wie schon bei der Einatemsituation werden für den Vokalausgleich und alle folgenden Übungen nur jeweils die Muskeln der linken Körperhälfte betrachtet, da diese im Vergleich zur rechtsseitigen Muskulatur keine signifikanten Unterschiede in ihren Aktivitätscharakteristiken aufzeigten. An Stellen, bei denen sich auffällige Unterschiede zeigen, wird darauf hingewiesen. Die vollständigen Daten, sind wie schon erwähnt, im Anhang aufgeführt. Tabelle 35 bis Tabelle 50 zeigen jeweils die mittleren Rangzahlen der Mediane der Absolutwerte nach Friedman der einzelnen Muskeln über die zehn Betrachtungsbereiche.

Die beschriebenen Verläufe der Mediane der muskulären Aktivitäten und die Rangzahlverläufe der folgenden Kapitel beziehen sich alle auf Abbildung 24. Der Übersichtlichkeit halber sind die Medianverläufe jeweils auf der linken Seite der Abbildung ohne Streuwerte dargestellt, rechts die Rangzahlen der Verlaufsanalyse.

4.2.2.1.2.1 Atemmuskulatur

Die betrachteten Atemmuskeln zeigen sowohl für die Medianverläufe als auch bei den Rangzahlen ein einheitliches Bild. Schon bei den Medianverläufen ist zu sehen, dass sie alle fast gleichsinnig vom Beginn bis kurz vor Ende des Vokalausgleiches in ihren Aktivitäten ansteigen. Dieses Verhalten ist auch nach der Rangzahlenverlaufsanalyse

für alle drei Muskeln zu sehen. Alle zeigen einen signifikanten Aktivitätsanstieg bis 90% der Übungszeit. Der sich daran anschließende kurze Aktivitätsabfall zum Ende hin ist hingegen nicht signifikant. Zu bemerken ist noch, dass der Aktivitätsanstieg ab ca. 40% der Übung deutlich steiler verläuft als davor.

4.2.2.1.2.2 Bauchmuskulatur

Es ist deutlich zu erkennen, dass OI von allen untersuchten Bauchmuskeln die höchsten Amplitudenwerte erreicht und von einem höheren Niveau zu Beginn der Übung ausgehend mit einer Versechsfachung dieses Ausgangswertes auch eine deutlichere absolute Aktivitätssteigerung aufweist. Bei der statistischen Analyse der Rangzahlen zeigt sich für alle drei Muskeln ein signifikanter Aktivitätsanstieg über die Übung hinweg. Alle Muskeln erreichen ihre maximale Aktivität nach 90% der Zeit und fallen danach in ihren Aktivitäten wieder ab. Jedoch ist dieser Aktivitätsabfall für keinen der drei Muskeln signifikant. Zeitlich fällt dieser Aktivitätsabfall ungefähr auf die Zeitspanne, in welcher sich die Tonintensität langsam abschwächt, wie im linken Teil der Abbildung zu sehen ist.

4.2.2.1.2.3 Hals-/Nackenmuskulatur

SCM zeigt einen eher untypischen Aktivitätsverlauf im Vergleich zu den bisher betrachteten Muskeln. Er zeigt wie einige Andere einen Aktivitätsabfall zur Mitte der Übung hin, welcher auch als signifikant zu sichern ist. Der darauf folgende signifikante Aktivitätsanstieg unterscheidet sich ebenfalls, denn das Maximum wird schon bei 70% der Einatemzeit erreicht. TD zeigt wie viele andere Muskeln einen fast kontinuierlichen und signifikanten Aktivitätsanstieg bis 90% vor einem nicht signifikanten Aktivitätsabfall.

4.2.2.1.2.4 Thoraxmuskulatur

Für die beiden untersuchten Muskeln der Thoraxmuskulatur ist zu bemerken, dass sie zwar auf einem ungefähr gleichen Aktivitätsniveau zum Beginn der Übung starten, sich dann aber unterscheiden, da SA einen stärkeren Aktivitätsanstieg zeigt als PM. Bei der

Betrachtung der Rangzahlenfolgen fällt auf, dass dieser Anstieg bei SA im Vergleich zu allen anderen Muskeln stufenförmig verläuft. Dieses stufenförmige Verlaufsmuster zeigt sich aber nur bei der Muskulatur der linken Körperhälfte. PM zeigt nach einem nicht signifikanten Aktivitätsabfall einen signifikanten und kontinuierlichen Anstieg seiner Muskelaktivität. Wie bei allen bisher betrachteten Muskeln folgt dem Aktivitätsmaximum (für beide bei 90%) ein Abfall am Ende.

4.2.2.1.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Die beiden Muskeln der tiefen Rückenmuskulatur zeigen einander ähnelnde Aktivitätsverläufe. Das heißt, bei beiden nimmt die Muskelaktivität zuerst leicht ab, steigt dann an und fällt zum Ende hin wieder ab. Noch deutlicher wird dies bei Betrachtung der Rangzahlenverläufe auf der rechten Seite der Abbildung. Wobei der Abfall der Muskelaktivitäten zur Mitte der Übung hin weder bei QL noch bei MF signifikant ist. Im Gegensatz zu MF ist für QL der anschließende Aktivitätsanstieg bis 90% der Übung signifikant. Der Aktivitätsabfall zum Ende hin zeigt aber wie schon bei den bisher betrachteten Muskeln keine Signifikanz. Da für MF bei keinem der Zeitpunktvergleiche eine signifikante Änderung der Muskelaktivität nachweisbar ist, ist dieser Muskel in seiner Aktivität über die Übung hinweg als wenig veränderlich anzusehen. Allerdings gilt hier, wie bereits weiter oben erwähnt, ebenfalls der Umstand, dass die Möglichkeit eines statistischen Nachweises von den Randbedingungen abhängig ist.

4.2.2.1.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Alle drei oberflächlichen Rückenmuskeln liegen, wie in der Abbildung zu sehen, mit ihren Aktivitätspotentialen sehr eng beieinander. Schon auf der linken Abbildung ist für alle Muskeln ein Aktivitätsanstieg über die Zeit zu sehen. Vor diesem zeigt allerdings EL bei den Rangzahlen einen Aktivitätsabfall bis 30% der Zeitdauer des Vokalausgleichs, der allerdings nicht signifikant ist. Dagegen ist der beobachtete Aktivitätsanstieg für alle Muskeln statistisch zu sichern. Der ebenfalls für alle Muskeln der oberflächlichen Rückenmuskulatur charakteristische Aktivitätsabfall nach einem Maximum bei 90% ist dagegen nicht signifikant.

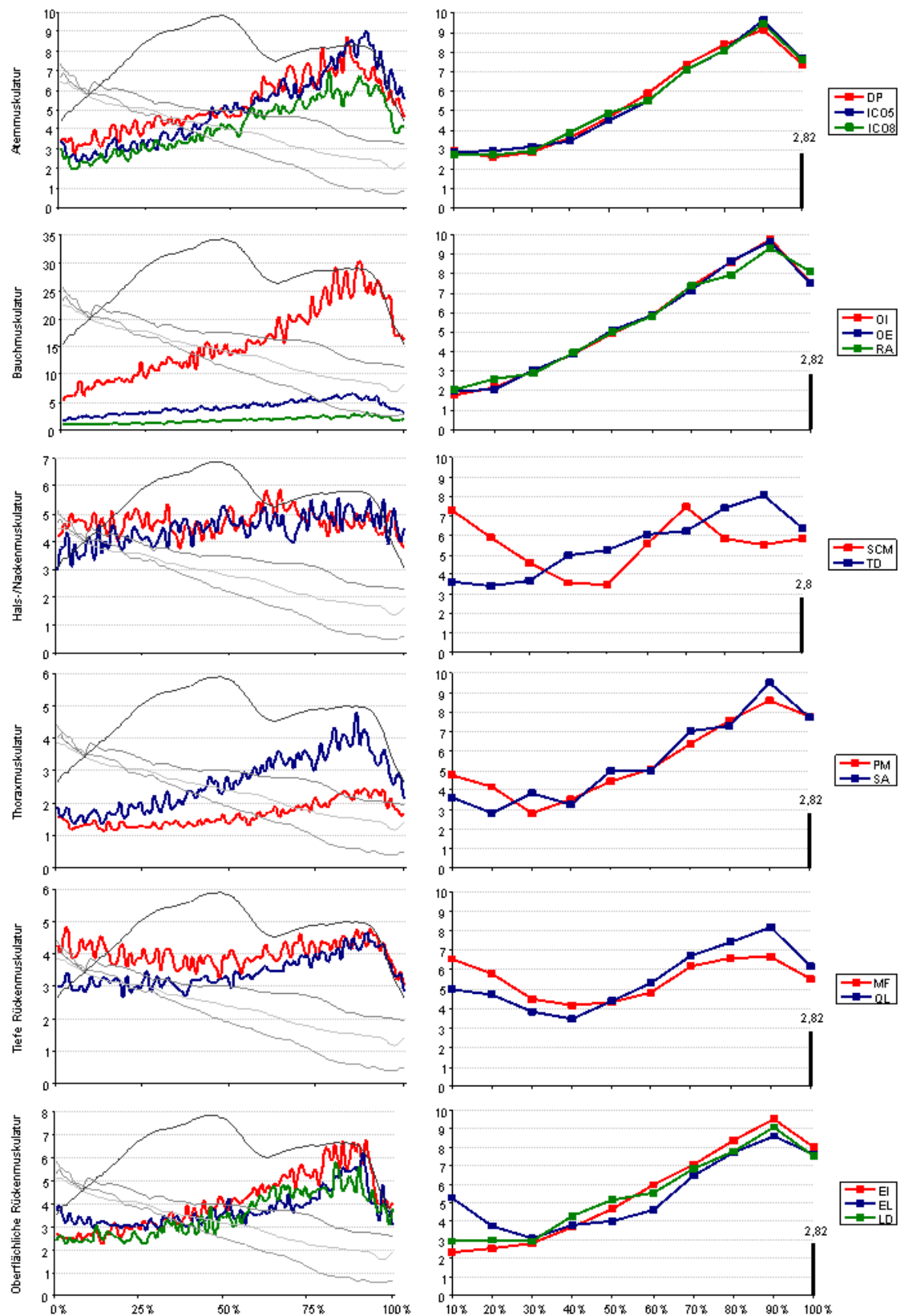


Abbildung 24 Vokalausgleich

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der mittleren Muskelaktivitäten in μV für die einzelnen Muskelgruppen über den Vokalausgleich in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund grau dargestellt die Bandauslenkungen und schwarz der Tonverlauf

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die einzelnen Muskelgruppen über die 10 Zeitabschnitte des Vokalausgleichs und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.1.3 Geschlechtsspezifische Unterschiede

4.2.2.1.3.1 Bandauslenkungen

Beim Vergleich der Bänderdehnungen im Verlauf des Vokalausgleiches zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Männern und Frauen. Es sind allerdings tendenzielle Unterschiede feststellbar. So sind es bei Band 1 immer die Männer, welche weitere Bänderdehnungen zeigen. Bei Band 2 sind es im ersten Betrachtungszeitraum und dann wieder ab der Mitte der Übung die Frauen, welche ihre Bänder in einem weiteren Ausmaß dehnen als die Männer. Bei Band 3 scheint es so, als wäre dieses Verhältnis zwischen Männern und Frauen genau umgekehrt im Vergleich zu Band 2. Das heißt, für Band 3 werden bei Männern im ersten Betrachtungszeitraum und dann auch wieder in der zweiten Hälfte des Vokalausgleiches weitere relative Dehnungen des Bandes beobachtet.

Tabelle 16 Vokalausgleich: Geschlechtsvergleich relativer Bandauslenkungen

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Bandauslenkungen in den 10 Zeitabschnitten über den Vokalausgleich

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die größeren relativen Bandauslenkungen im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Zeitabschnitte, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben größere relative Bandauslenkungen

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben eine größere relative Bandauslenkungen

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Relativer Bereich Einatmung	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Band 1										
Band 2										
Band 3										

4.2.2.1.3.2 Muskulatur

Vergleicht man männliche und weibliche Probanden dahingehend, wie stark jeder Muskel zu einem Zeitpunkt relativ zu seiner maximalen Beanspruchung innerhalb einer Übung aktiviert wird, sieht man, dass es relativ systematische Unterschiede zwischen den Geschlechtern gibt. Tabelle 17 ist zu entnehmen, dass besonders EI und SCM bei den männlichen Probanden auf beiden Körperhälften relativ zu ihrer maximalen Aktivität innerhalb des Vokalausgleiches höhere Aktivierungslevel über weite Teile der Übung

aufweisen. Diese Unterschiede sind aber nur für wenige Zeitbereiche bei SCM signifikant. Zusätzlich sieht man auch Seitenunterschiede bezüglich der Aktivierungen. So ist zum Beispiel für ICO5 auf der linken Körperseite zu sehen, dass zu fast allen Zeitpunkten die Männer in ihrer relativen Aktivierung höhere Werte erreichen und dass dieser Unterschied bei 90% sogar signifikant ist. Auf der rechten Seite hingegen gilt die stärkere Aktivierung für diesen Muskel bis auf das Ende der Übung immer für die Frauen. Ähnlich sieht dies für OE, EL, LD, TD und ICO8 im Seitenvergleich aus. Jeweils auf der linken Seite sind Tendenzen zugunsten der männlichen Probanden und auf der rechten zugunsten der weiblichen festzustellen. Ebenfalls höhere Aktivierungswerte der rechten Körperhälfte auf Seiten der Frauen zeigen sich für RA, OI, MF und DP. Signifikant sind diese höheren Aktivierungslevel im Vergleich zu den Männern aber nur für OI, OE, DP und ICO8 in einigen Zeitabschnitten.

Tabelle 17 Vokalausgleich: Geschlechtsvergleich in Bezug auf das übungsspezifische Maximum

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der Muskelaktivierungen im Vergleich zum übungsspezifischen Maximum von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Vokalausgleiches

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Vokalausgleich	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskeln	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Betrachtet man in Tabelle 18 die Unterschiede zwischen Männern und Frauen bezüglich des Aktivierungsniveaus der einzelnen Muskeln im Vergleich zu den maximalen Aktivierungen der Referenzmessungen, zeigt sich ein sehr einheitliches Bild. Bis auf wenige Ausnahmen sind es immer die Frauen, welche höhere relative Aktivierungen zeigen. Nur für SCM ist auffällig, dass sowohl auf der rechten als auch

auf der linken Seite in allen Zeitabschnitten die Männer höhere relative Aktivierungen zeigen. Bei einigen Muskeln ist gegen Ende der Übung ebenfalls eine stärkere Aktivierung bei den Männern feststellbar (OI, OE, ICO5), für PM allerdings am Anfang der Übung. Jedoch sind alle diese beschriebenen Unterschiede nicht signifikant.

Tabelle 18 Vokalausgleich: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Einatemphase.

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschieden signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Vokalausgleich	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskeln	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Die in Tabelle 19 dokumentierten Geschlechtsspezifika bezüglich der intermuskulären Koordination zeigen auch wieder deutliche Tendenzen für einzelne Muskeln und Muskelgruppen. So sind es für OI, EI, EL, SA, SCM und TD fast ausschließlich die Männer, welche höhere anteilige Muskelaktivitäten bezogen auf die Gesamtaktivität zeigen. Signifikant sind diese jedoch nur für EI auf der rechten Körperseite. Auch QL und MF überwiegen besonders auf der rechten Seite bei den Männern. Auf der linken Seite trifft dies für diese beiden Muskeln nur am Anfang der Übung zu. Andere Muskeln hingegen zeigen immer bei den Frauen höhere anteilige Aktivitäten. Dies betrifft vor allem RA, OE, LD, PM und bis auf wenige Ausnahmen die Atemmuskulatur. Für ICO5 ist dieser Unterschied der Frauen zu den Männern in einigen Zeitbereichen signifikant.

Tabelle 19 Vokalausgleich: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Vokalausgleiches

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren anteiligen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Vokalausgleich	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
Links										Muskeln	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

4.2.2.2 Dreiklang

4.2.2.2.1 Bandauslenkungen

Auch beim Dreiklang zeigt sich ein ähnliches Bild für den Verlauf der Bänderdehnungen (Abbildung 25) wie beim Vokalausgleich. Band 2 beginnt mit der weitesten Dehnung und verliert über die Zeit auch den meisten Umfang. Im Vergleich zur Kalibrierung erreicht es ebenfalls kurz vor Ende des Dreiklangs im Median sogar negative Werte. Den steilsten Abfall zeigt es bis zur Hälfte der Übung. Danach verliert es nur noch geringfügig an Umfang. Band 1 und 3 zeigen ein einander ähnelndes Dehnungsniveau zu Beginn der Übung und einen einander ähnelnden abfallenden Verlauf der Dehnungskurven. Der Rangzahlenverlauf zeigt einen signifikanten Verlust an Umfang für alle drei Bänder über die Übung hinweg, der aber die Auffälligkeiten für Band 2 nicht widerspiegelt.

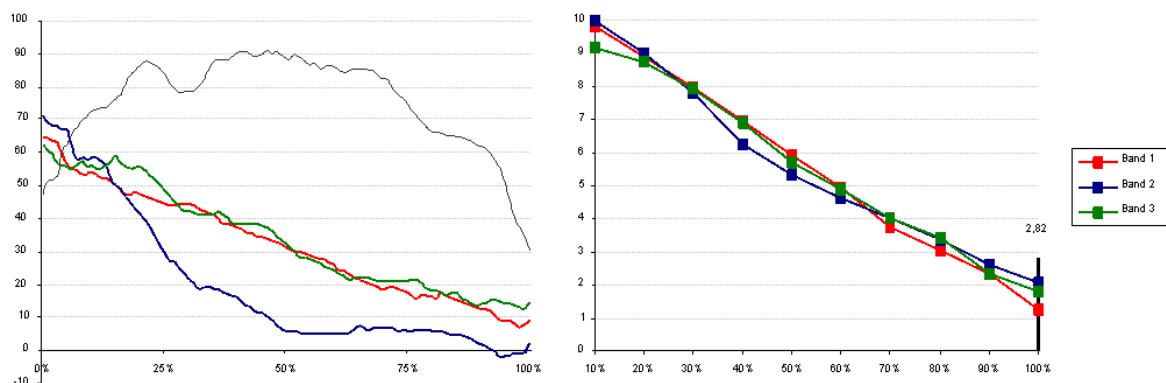


Abbildung 25 Dreiklang: Bandauslenkungen

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der relativen Bandauslenkungen in % für die drei Bänder über den Dreiklang in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund schwarz dargestellt der Tonverlauf

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die drei Bänder über die 10 Zeitabschnitte des Dreiklangs und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.2.2 Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über den Dreiklang

4.2.2.2.2.1 Atemmuskulatur

Die Atemmuskulatur zeigt für alle betrachteten Muskeln sowohl in den Absolutwerten als auch in den Rangzahlverläufen einen kontinuierlichen Anstieg der Aktivität. Dieser Aktivitätsanstieg ist auch für alle Muskeln signifikant. Bei ICO8 ist er allerdings am Ende

nicht mehr so ausgeprägt wie bei den anderen beiden Muskeln. Dies zeigt sich auch in der Rangzahlverlaufskurve mit einem fast horizontalen Verlauf ab 80% der Übung. ICO5 und DP erreichen ihren Maximalwert am Ende des Dreiklangs, wohingegen ICO8 diesen Wert schon bei 80% erreicht.

4.2.2.2.2 Bauchmuskulatur

Für die Bauchmuskeln zeigt sich beim Medianverlauf ein ähnliches Aktivitätsverhalten, wie es schon beim Vokalausgleich zu beobachten war. Wieder ist es OI, welcher von den drei Muskeln die höchsten Aktivitätswerte entwickelt und auch absolut am meisten ansteigt. Vergleicht man die absoluten Aktivitäten in μV , so zeigen sich beim Dreiklang deutlich höhere Werte (bis ca. 60 μV) als beim Vokalausgleich (bis ca. 30 μV). Auch die anderen beiden Muskeln zeigen einen kontinuierlichen Aktivitätsanstieg und auch hier sind die absoluten Aktivitätswerte höher, als dies beim Vokalausgleich der Fall war. In der linken Abbildung sieht man, dass dem Aktivitätsanstieg am Ende der Übung für alle Muskeln ein kurzer Aktivitätsabfall folgt, der sich aber in der Analyse der Rangzahlen nur bei OE widerspiegelt, denn nur OE hat sein Rangzahlmaximum bei 90 %, um dann noch leicht aber nicht signifikant an Aktivität zu verlieren. Insgesamt zeigen alle Muskeln einen signifikanten Aktivitätsanstieg über den Dreiklang hinweg. Ab 70 % der Zeit ist für OI eine Abflachung der Kurve zu sehen, während für RA das Aktivitätsmaximum im letzten Zeitabschnitt des Dreiklangs liegt.

4.2.2.2.3 Hals-/Nackenmuskulatur

Wie beim Vokalausgleich zeigt auch beim Dreiklang SCM ein differierendes Aktivitätsverhalten im Vergleich zu den anderen Muskeln. Schon bei der Betrachtung der medianen Aktivitätswerte sieht es so aus, als würde er im Gegensatz zu TD in seiner Aktivität im Verlauf der Übung abfallen. Dieses Bild bestätigt sich nach Analyse der Rangzahlen. Signifikant ist dieser Aktivitätsabfall allerdings nicht zwischen Anfang und Ende sondern zwischen seinem ersten Maximum bei 30% und seinem zweiten Minimum bei 90%. Die beiden auffälligen Aktivitätsspitzen bei 30 und 70% fallen zeitlich ungefähr auf den Anfang und das Ende der zu haltenden Quinte. Wobei an dieser Stelle anzumerken ist, dass diese Spitzen auf der rechten Körperhälfte nicht so stark

ausgeprägt sind. Auf beide Aktivitätsspitzen folgt ein Abfall der Muskelaktivitäten, welcher aber bis zum jeweiligen Tiefpunkt nach dem Spitzenwert nicht signifikant ist. Für TD hingegen ist schon auf der linken Seite der Abbildung ein kontinuierlich ansteigendes Aktivitätsmuster deutlich erkennbar. Beim Rangzahlenvergleich ist dieser Aktivitätsanstieg nach einem nicht signifikanten Abfall der Muskelaktivität zu Beginn der Übung statistisch zu sichern. Das Aktivitätsmaximum liegt für TD am Ende der Übung, wobei nach 70% ein Zwischenhoch erreicht wird, nach welchem die Aktivität nur noch gering ansteigt.

4.2.2.2.2.4 Thoraxmuskulatur

Von einem ungefähr gleichen Niveau startend zeigen beide Muskeln einen Aktivitätsanstieg bis zum Ende, wobei dieser bei SA stärker ausgeprägt ist als bei PM. Kurz vor Ende zeigen auch diese beiden Muskeln einen kurzen Aktivitätsabfall. Bei der statistischen Auswertung ist für beide nach einem nicht signifikanten Aktivitätsabfall zwischen den ersten beiden Betrachtungszeiträumen ein signifikanter Aktivitätsanstieg bis zum Ende zu verzeichnen, wobei dieser bei SA nach 70% der Übung deutlich an Steilheit abnimmt. Beide Muskeln zeigen aber erst im letzten Zeitraum ihre maximale Aktivität.

4.2.2.2.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Die beiden tiefen Rückenmuskeln zeigen einen Aktivitätsverlauf, der von einem Aktivitätsabfall am Anfang gefolgt von einem statistisch signifikanten Anstieg ihrer Muskelaktivitäten bis zum vorletzten Betrachtungszeitraum geprägt ist. Auch bei diesen beiden Muskeln ist ab 70% der Zeit eine Abflachung der Rangzahlverlaufskurve zu sehen. Der in der Mediankurve zu beobachtende Aktivitätsabfall kurz vor Ende des Dreiklangs ist deutlich, jedoch nicht signifikant. Es ist auch zu sehen, dass MF zwar bei einem höheren Aktivierungsniveau beginnt, am Ende aber auf einem niedrigeren im Vergleich zu QL ankommt.

4.2.2.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Die oberflächlichen Muskeln zeigen bei Betrachtung der Medianwerte der Aktivität einen ansteigenden Verlauf bis kurz vor Ende der Übung. Alle drei betrachteten Muskeln zeigen danach aber einen relativ steilen Aktivitätsabfall. Schon beim Blick auf die Aktivitätswerte zeigt EL einen auffallenden Aktivitätsverlust zwischen ca. 70 und 90%. Dieser ist auch im Rangzahlenverlauf sichtbar, wird allerdings nicht signifikant. Bei der statistischen Analyse ist für EL und LD auch zwischen dem ersten und zweiten Messzeitraum ein minimaler nicht signifikanter Aktivitätsabfall zu beobachten. Danach steigen sie wie auch EI in ihren Aktivitäten signifikant bis zum Ende des Dreiklangs an und erreichen ihr Maximum im letzten Betrachtungszeitraum. Der in der Mediankurve bei allen drei Muskeln noch deutlich imponierende Aktivitätsabfall kurz vor Ende des Dreiklangs ist im Rangzahlenverlauf nicht mehr zu sehen. Für alle drei Muskeln ist, wie auch bei den anderen Muskelgruppen häufig beobachtet, wieder ein Abflachen der Kurve ab 70% auffällig.

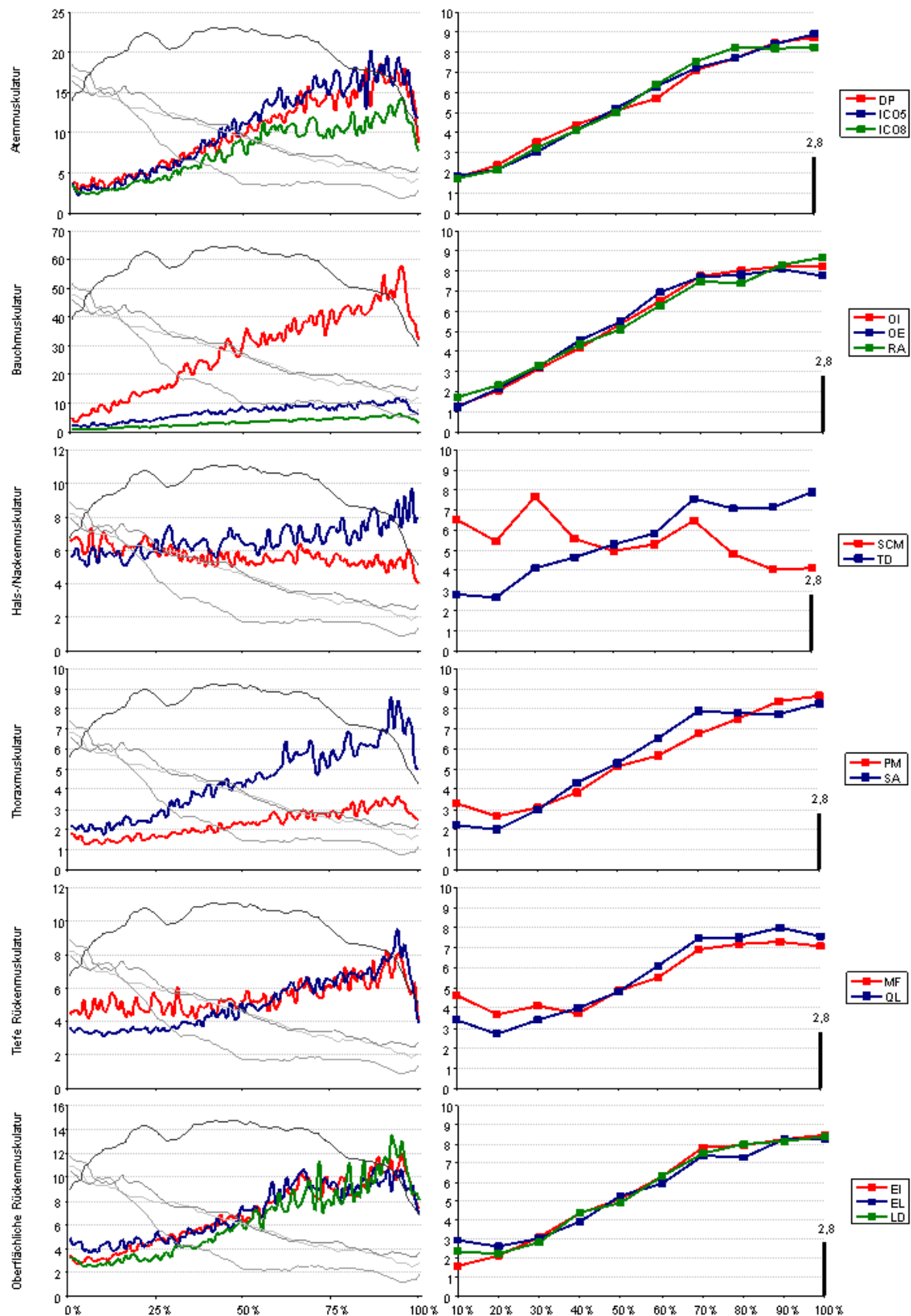


Abbildung 26 Dreiklang

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der mittleren Muskelaktivitäten in μV für die einzelnen Muskelgruppen über den Dreiklang in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund grau dargestellt die Bandauslenkungen und schwarz der Tonverlauf
 Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die einzelnen Muskelgruppen über die 10 Zeitabschnitte des Dreiklangs und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.2.3 Geschlechtsspezifische Unterschiede

4.2.2.2.3.1 Bandauslenkungen

In Tabelle 20 sieht man, dass im Geschlechtsvergleich meist die männlichen Probanden höhere Dehnungen der Bänder erreichen. Signifikant ist dieser Unterschied bei den Männern aber nur für Band 3 zu einem Zeitpunkt. Zum Beginn zeigen Band 2 und 3 allerdings bei den Frauen weitere Dehnungen, Band 2 auch in der zweiten Hälfte der Übung. Bei Band 1 ist es nur ein kurzer Abschnitt in der Mitte des Dreiklangs - im Bereich der gehaltenen Quinte - in dem die Frauen eine weitere Dehnung aufweisen.

Tabelle 20 Dreiklang: Geschlechtsvergleich relativer Bandauslenkungen

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Bandauslenkungen in den 10 Zeitabschnitten über den Dreiklang

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die größeren relativen Bandauslenkungen im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Zeitabschnitte, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben größere relative Bandauslenkungen

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben eine größere relative Bandauslenkungen

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Relativer Bereich Einatmung	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Band 1										
Band 2										
Band 3										

4.2.2.2.3.2 Muskulatur

Beim ersten Blick auf Tabelle 21 wird deutlich, dass beim Dreiklang meist die Frauen die höheren relativen Aktivitäten der einzelnen Muskeln in Bezug auf deren maximale Aktivierung innerhalb der Dreiklangübung aufzeigen. Signifikant sind diese Unterschiede für den Atemmuskel DP auf der rechten Seite über weite Bereiche der Übung ebenso wie für den Atemmuskel ICO8 und für die Bauchmuskeln OI, OE, MF, sowie die Rückenmuskeln EL, TD zu einzelnen Zeitpunkten. Auffällig ist, dass diese Zeitpunkte bis auf die Atemmuskulatur und den Bauchmuskel OI eher am Ende der Übung zu finden sind.

Die männlichen Probanden zeigen besonders beim Nackenmuskel SCM ein höheres Aktivierungsniveau im Übungsvergleich und diese Unterschiede sind für Großteile der Übung sogar signifikant. Ebenso ist die stärkere Aktivierung von ICO5 auf der rechten Seite gegen Ende der Übung bei den Männern signifikant. Auch die Thoraxmuskeln

PM, SA, der oberflächliche Rückenmuskel EI und die Bauchmuskulatur zeigen besonders auf der rechten Körperseite in einzelnen Zeitabschnitten bei den Männern höhere relative Aktivierungen bezüglich der übungsspezifischen Maximalaktivitäten.

Tabelle 21 Dreiklang: Geschlechtsvergleich in Bezug auf das übungsspezifische Maximum

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der Muskelaktivierungen im Vergleich zum übungsspezifischen Maximum von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Dreiklangs. Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind. Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil. Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil. Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$.

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Dreiklang	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	Rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OE										
										OI										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Beim Vergleich der Muskelaktivitäten bezogen auf das Maximum ihrer Aktivität aus der Referenzmessung (Tabelle 22) zeigt sich wieder ein ähnliches Bild wie schon beim Vokalausgleich. Für einen Großteil der Muskeln sind es die Frauen, welche tendenziell ein höheres Anspannungsniveau der Muskulatur aufweisen. Aber auch hier ist es wieder SCM, für den bei den Männern tendenziell höhere Aktivierungen beobachtet werden. Zusätzlich ist besonders für ICO5 links und OI beidseits gegen Ende der Übung noch eine deutliche stärkerer Aktivierung über mehrere Zeitpunkte bei den männlichen Probanden feststellbar. Allerdings sind auch diese Unterschiede nicht signifikant.

Tabelle 22 Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung in Bezug zur Referenz

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Dreiklangs.

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Dreiklang	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Vergleicht man die intermuskuläre Koordination (Tabelle 23), zeigen sich wie schon beim Vokalausgleich ähnliche Gruppen von Muskeln, die jeweils bei den Frauen bzw. bei den Männern höhere Aktivierungsanteile aufweisen. Für die Frauen betrifft dies sowohl eine größere Anzahl an Muskeln als auch längere Zeitbereiche, in denen diese Unterschiede signifikant sind. Vor allem für OE auf der linken Seite, SCM beidseits, PM links und ICO5 rechts ist dies charakteristisch. Wenn auch nicht signifikant, so ist doch deutlich sichtbar, dass auch RA, die tiefen und oberflächlichen Rückenmuskeln auf der linken Seite, die Thoraxmuskulatur und Teile der Atemmuskulatur bei den Frauen höhere Aktivierungsanteile tragen.

Bei den männlichen Probanden sind es wieder OI, die tiefe und oberflächliche Rückenmuskulatur besonders zum Anfang des Dreiklangs auf der rechten Seite und die Atemmuskulatur zum Ende hin für die höhere Aktivitätsanteile auffallen. Signifikant sind diese Unterschiede aber nur für EI auf der rechten Seite in der ersten Hälfte des Dreiklangs.

Tabelle 23 Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Dreiklangs

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren anteiligen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Dreiklang	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

4.2.2.3 Tonleiter

4.2.2.3.1 Bandauslenkungen

Bei allen drei Bändern ist in Abbildung 27 auf der linken Seite deutlich anhand der hinterlegten Tonspur zu sehen, dass die Bandauslenkungen keinen kontinuierlichen, sondern besonders am Anfang einen parallel zur wellenförmigen Tonspur verlaufenden Aktivitätsverlauf aufzeigen. Auch im weiteren Verlauf der Übung ist dieses sägezahnähnliche Bild der Bandauslenkungen zu sehen, allerdings verläuft es weniger deutlich mit dem Tonverlauf zusammen. Das weniger deutlich ausgeprägte Sägezahnmuster in der zweiten Hälfte der Übung ist im Wesentlichen auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Tempi und vor allem auch die Länge des am Ende ausgehaltenen Tones individuell variieren und mit zunehmender Dauer der Übung interindividuelle Schwankungen dieses Sägezahnmuster abschwächen..

Wie bei den bisherigen Übungen ist es Band 2, welches mit der weitesten Dehnung beginnt und den größten Umfangsverlust aufzeigt. Bei der Analyse der Rangzahlen zeigt sich wieder für alle drei Bänder eine signifikante Dehnungsabnahme über die Übung hinweg. Band 1, das Band um den oberen Thorax, zeigt bei 50% - also im Bereich des höchsten Tones - ein Plateau, um dann bis zum Ende wie die anderen Bänder an Umfang zu verlieren.

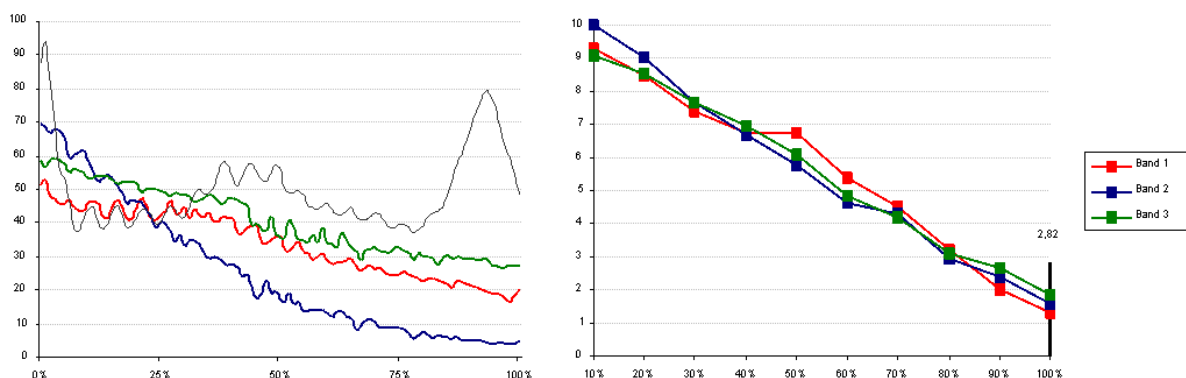


Abbildung 27 Tonleiter: Bandauslenkungen

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der relativen Bandauslenkungen in % für die drei Bänder über die Tonleiter in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund schwarz dargestellt der Tonverlauf

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die drei Bänder über die 10 Zeitabschnitte der Tonleiter und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.3.2 Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über die Tonleiter

Alle Betrachtungen bezogen auf die Aktivitäts- und die Rangzahlenverläufe beziehen sich auf Abbildung 28. Dort sind wie schon bei den vorangegangenen Übungen auf der linken Seite der Verlauf der Muskelaktivitäten im Median und auf der rechten Seite die Verläufe der Rangzahlen nach dem Friedman Test dargestellt.

4.2.2.3.2.1 Atemmuskulatur

Von den drei Atemmuskeln zeigen DP und ICO8 ein einander ähnelndes Aktivitätsmuster, wobei DP auf einem höheren Niveau aktiv ist als ICO8. Das Aktivitätsmuster ist durch einen signifikanten Aktivitätsanstieg zu Beginn und einen darauf folgenden leichten nicht signifikanten Aktivitätsverlust gekennzeichnet. DP erreicht sein Maximum bei den Amplitudenwerten in der Mitte der Übung, ICO8 hat an dieser Stelle auch eine Aktivitätsspitze, doch sieht man auf der linken Abbildung das Aktivitätsmaximum erst bei ca. 75%. ICO5 steigt in seinen Aktivitätsamplituden auch bis ca. 75% an, zeigt dabei aber kein so ausgeprägtes Sägezahnmuster, wie es bei den anderen beiden Muskeln zu beobachten ist.

Bei der Analyse der Rangzahlenfolge zeigt sich dann, dass für ICO5 ein signifikanter, wenn auch ab 50% nur noch allmählicher Aktivitätsanstieg nachweisbar ist und erst bei 80-90% der Übungszeit das Maximum erreicht wird, während die anderen beiden Muskeln signifikante Maxima bei 50% haben. Betrachtet man vergleichend den Tonverlauf und die Aktivitätskurven, so wird ersichtlich, dass die Spitzen-/Maximalwerte bei 50% auf den Zeitpunkt des höchsten Tones, auf die None, fallen.

4.2.2.3.2.2 Bauchmuskulatur

Schon auf den ersten Blick wird deutlich, dass auch alle drei Bauchmuskeln ein sägezahnartiges Aktivitätsbild zeigen, wobei jede Sägezahnspitze mit dem erzeugten Intensitätsmaximum eines Tones zusammenfällt, wie man durch die im Hintergrund dargestellte Tonkurve gut erkennen kann. Dies ist am deutlichsten bei OI feststellbar. Unabhängig von der tonbezogenen Dynamik steigt er in seiner mittleren Aktivität bis zur Mitte hin deutlich an, um dann flacher zu verlaufen mit einem Maximum kurz vor Ende

der Tonleiter. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der Rangfolge wider. RA zeigt ein ähnliches Aktivitätsverhalten, jedoch auf einem wesentlich geringeren Aktivierungsniveau. Die Maximalwerte für RA und OE werden etwa in der Mitte der Übung bei 50% erreicht, zum Zeitpunkt des höchsten Tones, der None. OE fällt in seiner Aktivität danach in seiner Aktivität deutlich ab, allerdings nicht signifikant.

4.2.2.3.2.3 Hals-/Nackenmuskulatur

SCM zeigt ein ähnliches Aktivitätsverhalten, wie es schon in den anderen Übungen zu beobachten war. Er beginnt auf einem hohen Aktivierungsniveau und fällt zum Beginn der Übung in seiner Aktivität ab. Dieser Abfall, welcher auch bei der statistischen Auswertung der Rangzahlen bis zum dritten Betrachtungszeitraum auffällig ist, erreicht ebenso wie der darauf folgende Anstieg bis zum Aktivitätsmaximum, welches wieder bei 50% erreicht wird, keine Signifikanz. Hingegen ist der Aktivitätsabfall bis 80% der Zeit, bei der dann der Minimalwert erreicht wird, signifikant. Die Betrachtung der Amplitudenwerte von TD auf der linken Abbildung vermittelt den Eindruck, als würden sich diese über den Zeitverlauf nicht stark ändern. Die statistische Auswertung der Rangzahlen zeigt allerdings einen signifikanten Anstieg der Muskelaktivität vom Beginn der Tonleiter bis zum Maximalwert am Ende.

4.2.2.3.2.4 Thoraxmuskulatur

PM zeigt in der Abbildung der Medianverläufe trotz des sägezahnartigen Bildes ein eher gleich bleibendes mittleres Aktivitätsniveau, wohingegen SA schon bei der Betrachtung der medianen Aktivitätswerte einen Anstieg bis zum Maximum des letzten ausgehaltenen Ton vermuten lässt, um danach bis zum Ende in seiner Aktivität drastisch abzufallen. Für PM zeigt sich bei der statistischen Auswertung, dass zwischen seinem Minimum bei 20% und seinem Maximum bei 90% ein signifikanter Aktivitätsanstieg liegt. Auch zeigt er schon einen zwischenzeitlichen Spitzenwert bei 50%, allerdings ist sein Aktivitätsanstieg bis zu diesem Punkt noch nicht signifikant. Dass das in der Mediankurve sichtbare Aktivitätsmaximum von SA kurz vor Ende der Übung nicht bei der statistischen Analyse der Rangzahlen als Maximum ersichtlich wird, liegt an der festgelegten Unterteilung der Gesamtdauer in 10 äquidistante Zeiträume

und der daraus hervorgehenden statistischen Betrachtung der Mediane über alle in dieser Zeit liegenden Messpunkte (siehe 3.5.3). Daher fallen in diesen letzten Zeitabschnitt sowohl der Maximalwert als auch die Werte des sich anschließenden deutlichen Aktivitätsabfalls, sodass der Median dieser Werte geringer ausfällt und bei der Bildung der Rangzahlen keinen Maximalwert mehr erreicht wird. Deshalb spiegelt sich auch der Aktivitätsabfall in der Rangzahlanalyse nicht wieder.

4.2.2.3.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Auch die beiden tiefen Rückenmuskeln zeigen das schon beschriebene sägezahnartige Bild, wobei ihr Verlauf beim Blick auf die Aktivitätswerte ein gleich bleibendes Bild über die Tonleiter suggeriert. Beim Vergleich von Anfang und Ende scheint sich der Eindruck eines gleich bleibenden Aktivitätsniveaus für MF auch statistisch zu bestätigen, da zwischen diesen beiden Werten kein signifikanter Unterschied besteht. Allerdings zeigt auch MF sein Maximum schon bei 50% und einen darauf folgenden signifikanten Aktivitätsabfall bis 80% der Tonleiter, also ungefähr zwischen None und letztem Staccato-Ton vor dem ausgehaltenen Endton. Für QL ist der Anstieg zum Maximum bei 50% signifikant, der Abfall zum Minimum bei 80% jedoch nicht.

4.2.2.3.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Bei der Betrachtung der medianen Aktivitätswerte ist zu sehen, dass EL und LD annähernd gleiche Aktivitätsverläufe zeigen. Für EI scheint es, als würde er im Vergleich zu den anderen beiden Rückenmuskeln bis kurz vor Ende der Tonleiter einen sehr hohen Aktivitätsanstieg zeigen, während die Aktivitätskurve von EL und LD nach dem höchsten Ton der Tonleiter eher gleich bleibend verläuft. Nach der statistischen Auswertung der Rangzahlen zeigt sich aber, dass alle drei Muskeln bis zu ihrem Maximum bei 50% der Übung einen signifikanten Aktivitätsanstieg aufweisen, um danach in ihren Aktivitäten bis zum Ende wieder abzufallen. Dieser Abfall ist allerdings nicht mehr signifikant.

Auch hier kommt das schon bei der Thoraxmuskulatur beschriebene Problem der Berechnung der Rangzahlen für diese Zeitbereiche zum Tragen, so dass sich das

ersichtliche Maximum der Aktivitätswerte bei 90% nicht als maximale Rangzahl in der statistischen Analyse niederschlägt.

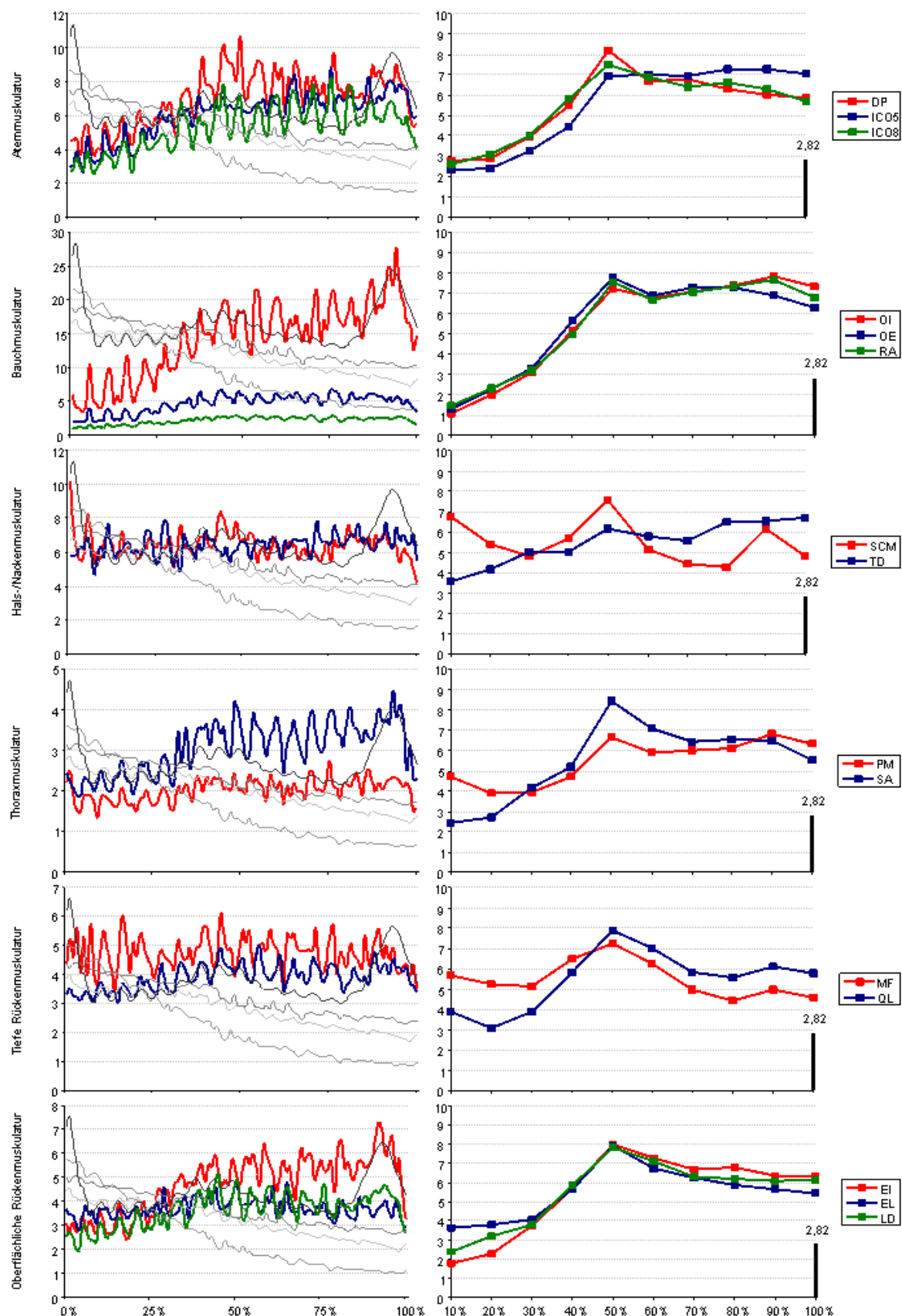


Abbildung 28 Tonleiter

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der mittleren Muskelaktivitäten in μV für die einzelnen Muskelgruppen über die Tonleiter in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund grau dargestellt die Bandauslenkungen und schwarz der Tonverlauf

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die einzelnen Muskelgruppen über die 10 Zeitabschnitte der Tonleiter und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.3.3 Geschlechtsspezifische Unterschiede

4.2.2.3.3.1 Bandauslenkungen

Im Geschlechtsvergleich zeigt Tabelle 24 für die Männer insgesamt eine stärkere Dehnung der Bänder in fast allen Bereichen. Signifikant ist der Unterschied besonders für Band 3 in den mittleren Zeitabschnitten der Tonleiter. Lediglich Band 2 zeigt in wenigen Bereichen im Anfangsbereich und in der zweiten Hälfte der Übung bei den Frauen größere, jedoch nicht signifikant verschiedene Dehnungswerte.

Tabelle 24 Tonleiter: Geschlechtsvergleich relativer Bandauslenkungen

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Bandauslenkungen in den 10 Zeitabschnitten über die Tonleiter

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die größeren relativen Bandauslenkungen im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Zeitabschnitte, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben größere relative Bandauslenkungen

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben eine größere relative Bandauslenkungen

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Relativer Bereich Einatmung	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Band 1										
Band 2										
Band 3										

4.2.2.3.3.2 Muskulatur

Vergleicht man Männer und Frauen für die Tonleiter hinsichtlich ihrer relativen Muskelaktivitäten bezogen auf die einzelnen übungsspezifischen Maximalwerte, so zeigt sich folgendes Bild (Tabelle 25). Große Teile der Muskulatur werden besonders von den Frauen stärker aktiviert. Signifikant ist dieser Unterschied für die Frauen aber nur bei EL und ICO8 jeweils zu einem Zeitpunkt. Bei den Männern ist es wie schon bei den ersten beiden Übungen SCM, der hier auf der linken Seite relativ zum übungsspezifischen Maximum signifikant höhere Aktivierungen zeigt. Tendenzen zu höheren Aktivierungen im Vergleich zu den Frauen gibt es auch für RA, OE rechts, QL links, teilweise MF, SA rechts PM und TD besonders zu Beginn sowie teilweise für ICO5 und DP. Wieder betrifft es mehr die rechtsseitige Muskulatur und die Zeitabschnitte am Beginn der Übung.

Tabelle 25 Tonleiter: Geschlechtsvergleich in Bezug auf das übungsspezifische Maximum

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der Muskelaktivierungen im Vergleich zum übungsspezifischen Maximum von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Tonleiter. Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind. Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil. Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil. Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$.

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Tonleiter	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Bezüglich der Aktivierung relativ zum Maximum der Referenzmessung zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den anderen Übungen (Tabelle 26). Es sind die Frauen, die bei den meisten Muskeln höhere relative Aktivierungen zeigen. Im Vergleich zu Vokalausgleich und Dreiklang sind diese Unterschiede für einige Muskeln jedoch signifikant. Dies gilt vor allem für die Rückenmuskulatur und deutlicher für die tiefe als für die oberflächliche. Bei der oberflächlichen Rückenmuskulatur zeigen sich nur für wenige Muskeln zu einzelnen Zeitpunkten signifikante Unterschiede. Auch Teile der Atemmuskulatur (ICO8, DP) zeigen im letzten Zeitabschnitt der Tonleiter, also im Endtonbereich, signifikant höhere relative Aktivierungen.

Für die Männer ist es wieder SCM, bei dem tendenziell höhere relative Aktivierungslevel erreicht werden. Zusätzlich ist es wie schon beim Dreiklang ICO5 auf der linken Seite, der von den Männern relativ zum Referenzmaximum mehr aktiviert wird.

Tabelle 26 Tonleiter: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Withney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Tonleiter.

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Tonleiter	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Bezüglich der intermuskulären Koordination lassen sich auch für den Vokalausgleich wieder Unterschiede für bestimmte Muskelgruppen feststellen. Bei den männlichen Probanden zeigen vor allem die tiefe Rückenmuskulatur, Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EI), die Nackenmuskulatur und Teile der Atemmuskulatur (DP) auf beiden Körperseiten jeweils höhere Aktivitätsanteile an der Gesamtaktivität im Vergleich zu den weiblichen Probanden. Für andere Muskeln (RA, SA, SCM, ICO5) sind es nur vereinzelte Zeitpunkte, an denen bei den Männern stärkere Aktivierungen auffallen. OI und ICO8 zeigen zwar längere Zeitbereiche mit tendenziell höheren Aktivierungsanteilen bei den männlichen Probanden, dies aber nur für die linke Körperhälfte.

Die Frauen hingegen zeigen bei großen Teilen der Bauchmuskulatur, der Thorax- und Halsmuskulatur, bei Teilen der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EL, ED) und Teilen der Atemmuskulatur (ICO5 und ICO8) jeweils die höheren Aktivitätsanteile. Signifikant sind die Unterschiede für die Frauen aber nur bei OE und SCM auf der linken Seite und zugunsten der Männer für EI auf der rechten, und dies für beide Muskeln jeweils über große Zeitabschnitte der Übung hinweg.

Tabelle 27 Tonleiter: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Tonleiter

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren anteiligen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Tonleiter	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskel	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

4.2.2.4 Schwellton

4.2.2.4.1 Bandauslenkungen

Betrachtet man den Verlauf der Bandauslenkungen auf der linken Seite von Abbildung 29, sieht man deutlich, dass Band 2, also das Band um die Flanken, zu Beginn der Übung die größte Dehnung aufweist und im letzten Viertel des Schwelltons die niedrigsten, sogar negative Werte im Vergleich zur Kalibrierung erreicht. Die anderen beiden Bänder haben zum Beginn der Übung einander ähnelnde Dehnungswerte und zeigen auch einen ähnlichen Dehnungsverlust zum Ende hin.

Bei der Analyse der Rangzahlverläufe zeigt sich, dass bei allen drei Bändern, wie nicht anders zu erwarten, über den Übungsverlauf ein signifikanter Abfall der Dehnung zu verzeichnen ist. Band 2 zeigt zu Beginn der Übung einen nur kurzzeitigen Umfangsverlust, um dann bis ca. 40% bei annähernd gleich bleibender Dehnung zu verlaufen. Erst dann verliert es kontinuierlich an Umfang. Dieses Verhalten lässt sich auch deutlich in der Rangzahlverlaufskurve beobachten. Bei 60% ist für dieses Band schon ein erster Tiefpunkt erreicht und die weitere Abnahme der Banddehnung zum Ende hin ist nicht mehr signifikant. Eine kontinuierliche und vergleichsweise starke Abnahme der Dehnung wird bei der Rangzahlberücksichtigung für Band 1 deutlich.

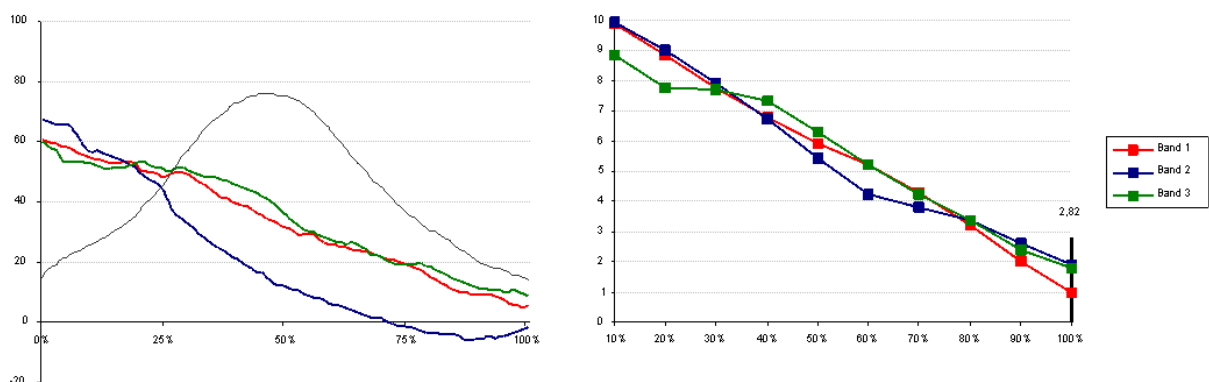


Abbildung 29 Schwellton: Bandauslenkungen

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der relativen Bandauslenkungen in % für die drei Bänder über den Schwellton in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund grau dargestellt der Tonverlauf

Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die drei Bänder über die 10 Zeitabschnitte des Schwelltons und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.4.2 Verlauf mittlerer Muskelaktivitäten über den Schwellton

In den folgenden Kapiteln beziehen sich alle Beschreibungen der Muskelaktivitäten auf Abbildung 30.

4.2.2.4.2.1 Atemmuskulatur

Die drei Atemmuskeln zeigen auf der linken Abbildung wie schon bei den ersten drei Übungen einen einander ähnelnden Aktivitätsverlauf, wenn auch auf unterschiedlichen Aktivierungsniveaus. ICO8 hat dabei jeweils die niedrigsten absoluten Aktivitätswerte. Alle zeigen nach einem kurzen Aktivitätsabfall zu Beginn der Übung einen kontinuierlichen Aktivitätsanstieg bis zum Ende, wobei dieser ab ca. 60% weniger steil verläuft, was sich bei den Rangzahlen dann für alle in einem einheitlichen Bild mit einem leichten Aktivitätsabfall am Anfang und einem sich anschließenden signifikanten Anstieg bis zum Ende der Übung äußert. Bei 50-70% zeigen alle drei Muskeln ein Aktivitätsplateau. Das Aktivitätsmaximum liegt dabei kurz nach der maximalen Tonintensität im Bereich des beginnenden Crescendos. Dies lässt sich sehr gut durch die hinterlegte Tonintensitätskurve nachvollziehen.

4.2.2.4.2.2 Bauchmuskulatur

Wie in allen anderen Übungen sieht man beim Schwellton einen kontinuierlichen Aktivitätsanstieg aller Bauchmuskeln über den Übungsverlauf. Auch hier ist wieder auffällig, dass OI von allen drei betrachteten Muskeln die höchsten Amplitudenwerte erreicht. Statistisch ist für alle Muskeln ein signifikanter Aktivitätsanstieg bis zum Ende der Übung gesichert. Dabei zeigen RA und OE ein ausgeprägtes Aktivitätsplateau bei ca. 60-70% der Zeit, wieder im Bereich des beginnenden Crescendos. Bei OI ist dieses deutliche Aktivitätsplateau nicht zu sehen.

4.2.2.4.2.3 Hals-/Nackenmuskulatur

SCM und TD zeigen schon in ihren Amplitudenverlaufskurven ein gegensätzliches Verhalten am Ende der Übung. Steigt TD in seiner Muskelaktivität bis kurz vor Ende deutlich und kontinuierlich an, so ist bei SCM nach einem Plateau mit seinem Maximum zwischen 40 und 60% eine deutliche Aktivitätsverminderung zu beobachten. Genau dieses Bild spiegelt sich in den Rangzahlenverläufen wieder. SCM zeigt nach einem kurzen Abfall der Aktivität einen deutlichen Anstieg bis zu seinem Maximum in der Hälfte der Übung, der jedoch nicht signifikant ist. Der darauf folgende Abfall bis zum vorletzten Betrachtungszeitraum dagegen ist signifikant. Damit liegt das Aktivitätsmaximum von SCM genau im Bereich der maximalen Tonintensität. TD zeigt, wie anhand der Mediankurve zu erwarten war, einen signifikanten Aktivitätsanstieg bis zum Ende, wobei auch bei ihm ein kleines Aktivitätsplateau zwischen 50 und 70% zu sehen ist.

4.2.2.4.2.4 Thoraxmuskulatur

SA und PM zeigen auf der linken Abbildung ein einander ähnelndes Aktivitätsverhalten mit einem Anstieg der Muskelaktivität zum Ende des Schwelltons hin und ein Aktivitätsplateau zwischen ca. 45 und 65%. Bei SA ist dieser Anstieg deutlicher ausgeprägt, gefolgt von einem Aktivitätsabfall kurz vor Ende der Übungen. Bei Betrachtung der Rangzahlenverläufe bestätigt sich, dass beide Muskeln ein ähnliches Aktivitätsmuster haben. Beide zeigen nach einem Aktivitätsabfall bis zum zweiten Betrachtungszeitraum einen signifikanten Aktivitätsanstieg bis zum Plateauspitzenwert bei 60% des Schwelltons. Danach fallen beide in ihren Aktivitäten ab, um dann bis zu den maximalen Aktivitätswerten am Ende der Übung noch einmal anzusteigen. Dieser Abfall- und Anstiegsverlauf am Ende der Übung ist aber nicht signifikant.

4.2.2.4.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Für QL zeigt die Amplitudenverlaufskurve auf der linken Abbildung einen Aktivitätsanstieg mit einem scheinbaren Plateau bei ca. 50-70% des Schwelltons. Dieses Bild mit einem signifikanten Anstieg über die gesamte Übung und einem

Aktivitätsplateau zwischen 50 und 80% der Zeit wird auf der Abbildung zum Rangzahlenverlauf bestätigt. MF zeigt hingegen eine eher gleich bleibende Aktivitätskurve. Beim Vergleich der Rangzahlen wird für ihn nach einem nicht signifikanten Aktivitätsabfall bis 20% ein signifikanter Plateau-Anstieg bei 50%-60% der Übungsdauer erreicht. Der darauf folgende Abfall der Muskelaktivität und der anschließende Anstieg bis zum Maximum am Ende des Schwelltons sind hingegen nicht signifikant. Für beide Muskeln ist bei den Amplitudenwerten auf der linken Abbildung ein Abfall der Aktivität kurz vor Ende der Übung zu sehen. Dieser ist bei der Rangzahlenanalyse nicht nachweisbar.

4.2.2.4.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Alle drei betrachteten Muskeln zeigen in den Amplitudenwerten einen annähernd gleichen Aktivitätsverlauf. Dies bestätigt sich bei den Rangzahlverläufen. Nach einem anfänglichen Aktivitätsabfall (EL und LD bei 20% der Zeit, EI bis 30%) ist für alle eine signifikanter Muskelaktivitätsanstieg bis zu dem schon oft gesehenen Plateau bei 60% feststellbar. Alle Muskeln fallen danach in ihrer Aktivität noch einmal geringfügig ab, um dann bis zu ihren Maximalwerten am Ende der Schwelltonübung anzusteigen. Sowohl der Abfall als auch der letzte Anstieg sind aber bei allen nicht signifikant. Wie schon bei den tiefen Rückenmuskeln fällt für EI ein Aktivitätsabfall kurz vor Ende der Übung in den Amplitudenverläufen auf, welcher sich aber nicht in den Rangzahlen widerspiegelt.

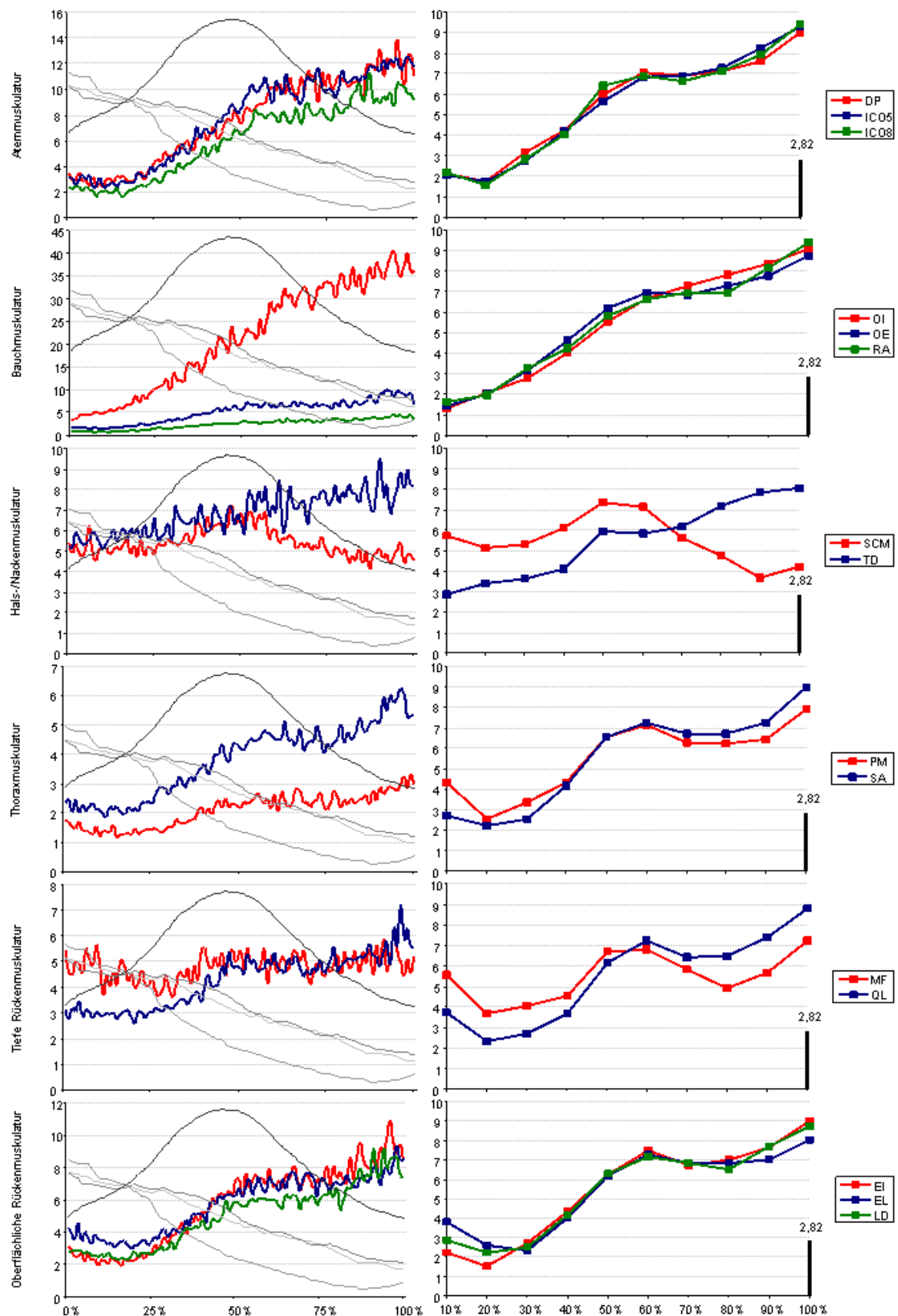


Abbildung 30 Schwellton

Linke Spalte: Dargestellt sind jeweils die Medianverläufe der mittleren Muskelaktivitäten in μV für die einzelnen Muskelgruppen über die Tonleiter in prozentualen Zeitanteilen, im Hintergrund grau dargestellt die Bandauslenkungen und schwarz der Tonverlauf
 Rechte Spalte: Dargestellt sind die mittleren Rangzahlenverläufe für die einzelnen Muskelgruppen über die 10 Zeitabschnitte der Tonleiter und die kritische Rangzahldifferenz (2,82) zur Orientierung als schwarzer Balken

4.2.2.4.3 Geschlechtsspezifische Unterschiede

4.2.2.4.3.1 Bandauslenkungen

Wie bereits in den bisher betrachteten Übungen sind Unterschiede in der Bänderdehnung zwischen Männern und Frauen nachweisbar. Zeigen die Männer sowohl bei Band 1 als auch bei Band 3 jeweils tendenziell die größeren Auslenkungen, ist es bei Band 2 so, dass am Anfang und Ende jeweils die Frauen über einen längeren Zeitraum hinweg dieses Band gedehnter halten als die Männer.

Die Unterschiede sind jedoch für kein Band und weder für Männer noch für Frauen signifikant.

Tabelle 28 Schwellton: Geschlechtsvergleich relativer Bandauslenkungen

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der relativen Bandauslenkungen in den 10 Zeitabschnitten über den Schwellton

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die größeren relativen Bandauslenkungen im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Zeitabschnitte, bei denen diese Unterschieden signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben größere relative Bandauslenkungen

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen größeren relative Bandauslenkungen

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

Relativer Bereich Schwellton	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Band 1										
Band 2										
Band 3										

4.2.2.4.3.2 Muskulatur

Auch beim Schwellton ist zu sehen, dass meist die Frauen die höheren relativen Aktivitäten im Vergleich zum jeweiligen Maximum innerhalb der Übung für die einzelnen Muskeln entwickeln (Tabelle 29). Signifikant sind diese Unterschiede bei den Frauen aber nur für einzelne Muskeln (RA, OE, OI, MF, EI, TD) zu einzelnen Zeitpunkten und eher gegen Ende der Schwelltonübung. Die männlichen Probanden zeigen höhere relative Aktivitäten für die tiefe Rückenmuskulatur, Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EI), die Thoraxmuskulatur und die Hals-/Nackenmuskulatur jeweils eher am Anfang des Schwelltons und für einen Großteil der Muskulatur im letzten Beobachtungszeitraum. Signifikant sind diese Unterschiede zugunsten der Männer jedoch zu keinem Zeitpunkt.

Tabelle 29 Schwellton: Geschlechtsvergleich in Bezug auf das übungsspezifische Maximum

Mann-Whitney-U-Test zum Vergleich der Muskelaktivierungen im Vergleich zum übungsspezifischen Maximum von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Schwelltons

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Schwellton	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskeln	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten drei Übungen sind es beim Schwellton bis auf zwei Ausnahmen alle Muskeln, die bei den Frauen höhere relative Aktivierungen im Vergleich zum Referenzmaximum entwickeln (Tabelle 30). Diese Unterschiede im Sinne stärkerer Muskelaktivierung bei den Frauen sind auch für jeweils größere Zeitbereiche signifikant. Dies betrifft besonders die Rückenmuskulatur (tiefe und oberflächliche) und die Atemmuskulatur, wobei der Schwerpunkt immer gegen Ende der Übung zu sehen ist. Die Männer zeigen wie auch schon bei den anderen Übungen höhere relative Aktivitäten für SCM, beim Schwellton zusätzlich noch für PM links. Diese Unterschiede sind jedoch wie auch schon bei den anderen Übungen nicht signifikant.

Tabelle 30 Schwellton: Geschlechtsvergleich Muskelaktivierung im Bezug zur Referenz

Mann-Withney-U-Test zum Vergleich der relativen Muskelaktivierungen von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche der Einatemphase.

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren relativen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln, bei denen diese Unterschieden signifikant sind.

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen, wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Schwellton	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskeln	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

Betrachtet man Tabelle 31, so sieht man deutlich, dass es bei der intermuskulären Koordination zwischen Männern und Frauen vor allem große Seitenunterschiede gibt. Sind es auf der linken Körperseite die Frauen, die die höheren anteiligen Muskelaktivitäten an der Gesamtaktivität aufbringen, gilt für die rechte Seite, dass die männlichen Probanden mehr anteilige Muskelaktivitäten zeigen. Für einige Muskelgruppen ist sowohl auf der linken als auch auf der rechten Körperhälfte eine Tendenz zur Dominanz bei einem der beiden Geschlechter zu sehen. Dies trifft zugunsten der Männer vor allem für die tiefe und Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur, SCM, OI und am Beginn der Übung für SA zu. Zugunsten der Frauen zeigen sich bezüglich beider Körperhälften höhere Anteilige Aktivitäten vor allem für OE, aber auch für die Interkostalmuskulatur, PM und LD.

Signifikant sind die Unterschiede aber nur für EI rechts auf Seiten der Männer und für OE auf beiden Seiten bei Frauen.

Tabelle 31 Schwellton: Geschlechtsvergleich intermuskuläre Koordination

Mann-Withney-U-Test zum Vergleich der intermuskulären Koordination von Männern und Frauen für alle Muskeln einzeln für jeden der 10 Zeitbereiche des Schwelltons

Dargestellt sind farblich hell hinterlegt die höheren anteiligen Muskelaktivitäten im Median und farblich dunkel hinterlegt jeweils die Muskeln bei denen diese Unterschiede signifikant sind

Hellblau/Blau = männliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Rosa/Rot = weibliche Probanden haben einen höheren relativen Aktivitätsanteil

Signifikante Unterschiede bestehen wenn $p < 0,05$

10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %	relativer Bereich Schwellton	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
links										Muskeln	rechts									
										DP										
										ICO5										
										ICO8										
										OI										
										OE										
										RA										
										SCM										
										TD										
										PM										
										SA										
										MF										
										QL										
										EI										
										EL										
										LD										

5 Diskussion

Aufgrund des großen Umfangs der erzielten Ergebnisse werden diese zuerst für Einatmung und Phonation getrennt, nach Muskelgruppen geordnet und jeweils zusammengefasst dargestellt, bevor anschließend die in der Einleitung postulierten Hypothesen diskutiert werden.

5.1 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Zu Gunsten einer komprimierten und funktionelleren Darstellung der Ergebnisse wird die Strukturierung des Ergebnisteils verlassen. Die statischen und dynamischen Ergebnisse werden für die beschriebenen Muskelgruppen gemeinsam zuerst für die Einatmung und anschließend für die Phonation dargestellt.

5.1.1 Einatmung

5.1.1.1 Atemmuster

Sowohl Thorax, Flanken als auch Bauch nehmen während der Inspiration an Umfang zu. Im Bereich des Bauches und des unteren Thorax ist die größte Ausdehnung schon vor Ende der Inspiration erreicht. Nur die Erweiterung im Bereich der oberen Thoraxapertur nimmt bis zum Ende der Inspiration zu, erreicht dabei aber nicht die Ausdehnungswerte der beiden tiefer platzierten Bänder. Das Phänomen, dass im Bereich des unteren Thorax (Flanken) und des Bauches die expiratorische Abnahme des Umfanges schon vor Ende der Inspiration einsetzt, wurde schon beschrieben (Seidner und Wendler 1978, Thorpe et al. 2001). Die größte Umfangszunahme erfolgt im Bereich der Flanken, in dem Bereich also, in dem die Lunge physiologischer Weise die größten Expansionsmöglichkeiten besitzt (Schmidt et al. 2000, Benninghoff 2003). Im Vergleich zur Atmung in Ruhe oder beim Sprechen wird dieser Bereich der Flanken also gezielt während der klassischen sängerischen Inspiration in einem größeren Maße mit eingebunden.

Bei professionellen Sängern einer anderen Stilrichtung (Country-Sänger) konnte demgegenüber gezeigt werden, dass sich die Atemmuster während des Singens nicht von denen während des Sprechens unterscheiden (Hoit et al. 1996). Diese Sänger atmeten demnach im Gegensatz zu unseren untersuchten, sich in der klassischen Ausbildung befindlichen Sängern nicht vorwiegend im Bereich der Flanken sondern im Bereich des oberen Thorax. Damit wird deutlich, dass die klassische Gesangsausbildung auch auf eine gezielte Ausbildung der Atmung zu fokussieren ist, um die gewünschte costo-abdominelle Atmung zu optimieren.

Ergebnisse von Thomasson (Thomasson und Sundberg 1999), der bei klassischen Sängern weitere Dehnungskurven im Bereich der oberen Rippen im Vergleich zum abdominalen Bereich fand, könnten sich auf eine unterschiedliche Kalibrierungsmethode zurückführen lassen. Er setzte die Ausdehnungen im Bereich der Rippen und des Abdomens zu den individuell gemessenen Lungenvolumina während eines Atemzyklus in Beziehung. Für die Messungen im oberen Thoraxbereich mag dies ein geeignetes Mittel zu sein. Da die Dehnung im abdominalen Bereich aber nicht unmittelbar mit den inspirierten Luftvolumina korrespondiert, sondern vielmehr von individuellen morphologischen Unterschieden abhängt, erscheint diese Korrelationsmethode weniger geeignet, um eine Aussage über die relativen Dehnungen im Bereich von Thorax und Abdomen zu treffen. Durch die individuelle Kalibrierung der Atembänder unabhängig von funktionellen Lungenparametern kann mit unserer Untersuchung eher ein unabhängiges individuelles Atemmuster beschrieben werden.

5.1.1.2 Atemmuskulatur

Für alle Atemmuskeln ist zu sehen, dass sie erst nach einem Aktivitätsabfall ungefähr ab der Hälfte der Einatemphase in ihrer Aktivität ansteigen. Dieser Aktivitätsanstieg verläuft dann parallel zu den Dehnungsänderungen der beiden Bänder um Flanken und Bauch. Die Atemmuskeln wiederum lassen in Ihrer Aktivität nach, sobald die Dehnung von Flanken und Bauch abnimmt. Somit ist zu vermuten, dass die untersuchte Atemmuskulatur während der Inspiration die Weitung des Thorax im Bereich der Flanken und des Bauches muskulär unterstützt. Der Aktivitätsabfall zu Beginn der Einatmung ist wahrscheinlich in den zu diesem Zeitpunkt wirkenden passiven Dehnungskräften des Thorax begründet. Erst wenn diese passiven Kräfte nicht mehr genügen, den Thorax ausreichend zu weiten, ist eine Aktivitätszunahme der Muskulatur

nötig. Ob und in welchem Ausmaß die Interkostalmuskulatur der oberen Zwischenrippenräume die Weitung im oberen Thoraxbereich muskulär unterstützt, ist aufgrund der im Vorfeld gewählten Positionierung der Elektroden im Bereich der unteren Interkostalmuskulatur (Vergleiche 5.3.4) in dieser Arbeit noch nicht zu diskutieren und wäre eine interessante Fragestellung für weitere Untersuchungen. Es wäre insbesondere zu untersuchen, ob die Interkostalmuskulatur in höheren Thoraxbereichen bis zum Ende aktiv bleibt und somit die Weitung im oberen Thoraxbereich unterstützt.

5.1.1.3 Bauchmuskulatur

Auffällig ist, dass OI im Vergleich zu den anderen beiden untersuchten Bauchmuskeln ein entgegen gesetztes Aktivitätsverhalten zeigt. Wie für einen expiratorisch wirkenden Muskel (Abe et al. 1996) zu erwarten ist, nimmt seine Muskelaktivität im Laufe der Inspiration ab. Somit kann sich der Bereich des Bauches durch die Erschlaffung von OI während der Inspiration ausdehnen. In dieser Untersuchung nicht im Vordergrund stehend und deshalb bisher nicht erwähnt, muss aber die Tatsache berücksichtigt werden, dass insbesondere OI beim ruhigen Stehen derjenige Muskel ist, der von den Bauchmuskeln als einziger permanente relevante Aktivitätsniveaus aufweist. Das heißt, eine vollständige Erschlaffung von OI ist nicht registrierbar.

Die anderen beiden Bauchmuskeln zeigen auf einem niedrigeren Niveau einen der Atemmuskulatur ähnelnden Aktivitätsverlauf. Es bleibt die Frage, ob sie zumindest mit einem geringen Teil zur Weitung des Thorax und des Bauches im Bereich der unteren beiden Atembänder beitragen oder ob die registrierte Aktivität den cross talk anderer Muskeln darstellt, welche die Inspiration unterstützen (DP, untere Interkostalmuskulatur).

5.1.1.4 Hals-/Nackenmuskulatur

Aufgrund der Tatsache, dass sich der obere Thoraxbereich bis zum Ende der Inspiration ausdehnt, ist zu erwarten, dass die Aktivität von SCM, welcher als akzessorischer Inspirationsmuskel des oberen Thorax betrachtet wird (Basmajian und De Luca 1985, Benninghoff 2003), auch bis zum Ende hin ansteigt. Diese Vermutung

wird wie schon in anderen Untersuchungen (Pettersen und Westgaard 2002, Pettersen 2005, Pettersen et al. 2005, Watson et al. 2011) auch durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt. Deutlich zu sehen ist dies auch daran, dass sich die Aktivitätsverlaufskurve von SCM deutlich in der Dehnungskurve des Thoraxbandes widerspiegelt.

TD hingegen zeigt keine sich deutlich ändernden muskulären Aktivitäten und ist damit über die Einatmung hinweg in seiner Aktivität als konstant anzusehen, was darauf schließen lässt, dass dieser Muskel nicht zur Inspiration beiträgt

5.1.1.5 Thoraxmuskeln

PM kann bei aufgestützten und somit festgestellten Armen als Atemhilfsmuskel zur Dehnung im Bereich des oberen Thorax genutzt werden. Da in der vorliegenden Untersuchung die Probanden dazu aufgefordert wurden, die Gesangsübungen mit locker herabhängenden Armen in aufrechter Körperposition auszuführen, ist eine Aktivität von PM im Sinne eines Atemhilfsmuskels nicht zu erwarten. Diese Vermutung wird durch die vorliegenden Ergebnisse unterstützt und ist vor allem auch daran zu erkennen, dass er in seiner Aktivität bereits abfällt, während das Band um den oberen Thoraxbereich noch deutlich an Umfang zunimmt. Entgegen den Ergebnissen von Mendes (Mendes et al. 2006) kann durch unsere Untersuchung für diesen Muskel keine unterstützende Funktion für die Weitung im oberen Thoraxbereich während der sängerischen Atmung abgeleitet werden.

SA kann aufgrund seiner vielen Ansatzpunkte sowohl im oberen als auch im unteren Thoraxbereich zur Dehnung beitragen. Sein Aktivitätsmuster, welches einen parallelen Verlauf zu den Dehnungskurven der unteren beiden Atembänder zeigt, bekräftigt die Vermutung, dass er eine muskulär unterstützende Funktion für die Dehnung im Bereich der Flanken hat. Jedoch fällt er in seiner Aktivität ab noch bevor die beiden unteren Bänder an Umfang verlieren. Dieser Befund ist bisher nicht in der Literatur dokumentiert.

5.1.1.6 Tiefe Rückenmuskulatur

Beide betrachteten Muskeln zeigen nach einem kurzen Aktivitätsabfall zu Beginn der Inspiration einen Aktivitätsverlauf parallel zu den Dehnungskurven im unteren Thorax- und Bauchbereich. Dies lässt vermuten, dass QL im Sinne seiner funktionell anatomischen Wirkungsweise mit dazu beiträgt, die sich während der Inspiration weitende untere Thoraxapertur zu stabilisieren. Auch MF zeigt dieses Aktivitätsmuster. Sein Aktivitätsabfall nach Erreichen der maximalen Dehnung im Flanken und Bauchbereich ist im Vergleich zu QL weniger ausgeprägt. Dies könnte bedeuten, dass er eine größere Stabilisierungswirkung vor allem auch der unteren Wirbelsäule bis zum Ende der Inspiration hat und so die Aufrichtung der Wirbelsäule in diesem Bereich begünstigt und damit einem vorzeitigen Entweichen der Luft entgegen wirkt. Für Sänger sind diese Aktivitätsmuster bisher nicht beschrieben, decken sich aber mit allgemeinen physiologischen Daten (Ward et al. 2009, Phillips et al. 2008).

5.1.1.7 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Bei diesen betrachteten Muskeln fällt auf, dass sie nach einem Aktivitätsabfall einen Anstieg bis ca. 70% zeigen. Danach bleiben sie bis zum Ende der Inspiration in ihrer Aktivität relativ konstant. Dieser Aktivitätsverlauf lässt vermuten, dass die oberflächliche Rückenmuskulatur dazu beiträgt, durch eine Stabilisierung der LWS und BWS einem Zusammensinken des Thorax während der Inspiration entgegen zu wirken. Somit können auch für die Inspirationsphase der sängerischen Atmung gleichartige Ergebnisse wie von Cala (Cala et al. 1992) für eine normale Inspiration nachgewiesen werden.

5.1.1.8 Zusammenfassende Überlegungen für die Einatmung

Zusammenfassend ist für die Inspiration zu sagen, dass die Atemmuskulatur die größte funktionelle Bedeutung für die muskuläre Unterstützung besitzt, diese aber erst am Ende des Inspirationszyklus als aktiv zu beeinflussender Prozess von Bedeutung ist, da die Inspiration zu Beginn einen passiven Prozess darstellt. Aus den erhobenen Daten geht mit den genutzten Messmethoden jedoch nicht hervor, bei welchem funktionellen

Lungenvolumen die Muskulatur zusätzlich zu den passiven Dehnungskräften aktiv wird. Auffällig ist, dass die Muskulatur des Thorax und des Rückens zu einem früheren Zeitpunkt in ihrer Aktivität ansteigt, als es für die Atem- und Bauchmuskulatur zu sehen ist. Bevor also die Inspiration aktiv muskulär unterstützt wird, scheint eine Stabilisierung der LWS, BWS und des Thorax notwendig zu sein, um den inspiratorischen Luftstrom aufrecht halten zu können.

Es ist auch zu sehen, dass alle unterstützenden Muskeln bis auf SCM in ihrem Aktivitätsmuster parallel zu den Dehnungskurven der unteren beiden Atembänder verlaufen. Das heißt, dass ihre Aktivität so lange zunimmt, wie sich die beiden Bänder dehnen, ehe sie in ihrer Aktivität nachlassen, sobald die Bänder an Umfang verlieren. Sie unterstützen so im Wesentlichen die Weitung im costo-abdominalen Bereich, dem Bereich der für die sängerische Einatmung als optimal für die Inspiration angesehen wird (Seidner und Wendler 1978, Biesalski und Frank 1994, Sundberg 1997).

Von Pettersen gemachte Beobachtungen (Pettersen 2006), welche für PM bei einigen Sängern eine muskuläre Unterstützung für die Weitung im oberen Thoraxbereich während der Inspiration zeigten, konnten in unserer Untersuchung nicht bestätigt werden. Möglicherweise ist dies bei erfahrenen Sängern der Fall, was spätere Untersuchungen zeigen müssen. TD hat mit einer konstant verlaufenden Aktivität über die Einatmung keine offensichtliche Bedeutung für deren muskuläre Unterstützung. Von den von uns untersuchten Muskeln bei Studienanfängern scheint nur SCM diese Dehnung im oberen Brustkorb zu unterstützen. OI trägt im Gegensatz zu allen anderen Muskeln mit einer Aktivitätsabnahme, also seiner Entspannung und somit erhöhten Dehnbarkeit zur Inspiration bei. Durch seine Kontraktionsabnahme und die damit verbundene erhöhte Dehnbarkeit ist es bei der Inspiration möglich, den Bauchraum durch das Tiefertreten des Zwerchfells zu weiten.

Die Beobachtungen entsprechen den Anforderungen an die seitliche Bauchmuskulatur während der Inspiration, wie sie bei Thorpe (Thorpe et al. 2001) beschrieben werden. In seiner Untersuchung zur sängerischen Stütze geht er davon aus, dass während der Inspiration die Bauchmuskulatur besonders im lateralen Bereich entspannt sein muss, um eine Erweiterung in diesem Bereich zuzulassen. Während des Singens ist dann eine Stütze besonders aus diesem lateralen abdominalen Bereich anzustreben (Vergleiche 5.1.2.3).

5.1.2 Übungen

Für die Zusammenfassung der Ergebnisse der Übungen werden diese wieder nach Muskelgruppen geordnet dargestellt. Es werden Gemeinsamkeiten der muskulären Aktivitätsmuster in den verschiedenen Übungen dargestellt und Unterschiede erläutert.

5.1.2.1 Atemmuster

Die Ausdehnung im unteren Thoraxbereich (Band 2) ist in allen vier Übungen zu Beginn der Phonation relativ zur Referenzmessung am größten. Im Verlauf aller Übungen nimmt die Dehnung in diesem Bereich am meisten ab und erreicht kurz vor Ende der Phonation in drei der vier Übungen sogar negative Werte. Das bedeutet, dass die Probanden in der Situation der Gesangsübung dazu in der Lage waren, ihren Thorax im Bereich der Flanken weiter einzuengen, als sie dies in einer maximalen willkürlichen Expiration konnten. Damit stellt die sängerische Atmung andere Anforderungen an die Sänger als die physiologische.

Der obere Thorax (Band 1) und der Bauch (Band 3) verlieren ebenfalls über die Expiration kontinuierlich an Umfang. Die relativen Auslenkungskurven beider Bereiche verlaufen annähernd parallel. Im Vokalausgleich und bei der Tonleiter hat jeweils das Band im Bereich des Bauches sowohl am Anfang als auch am Ende die größere Ausdehnung. Für Dreiklang und Schwellton liegen die beiden Dehnungskurven so eng beieinander, dass sie sich an einigen Zeitpunkten sogar kreuzen. Die größte Zu- und Abnahme des Dehnungsvolumens findet während der Phonation in allen vier Übungen im Bereich der Flanken (Band 2) statt. Dieser Bereich kann damit als funktionell bedeutendster für die sängerische Atmung angesehen werden. Dies deckt sich mit den Empfehlungen von Biesalski (Husler und Rodd-Marling 1978, Seidner und Wendler 1978, Sundberg 1997, Biesalski und Frank 1994) für eine effektive sängerische Atmung.

5.1.2.2 Atemmuskulatur

Die Aktivität der betrachteten Atemmuskeln steigt über die Dauer der vier Übungen an. Der Punkt ihrer maximalen Beanspruchung, also das Aktivitätsmaximum differiert nur

leicht zwischen den vier Gesangsübungen. Für Vokalausgleich, Dreiklang und Schwellton liegt dieser Punkt am Ende der Übung, wobei bei der Dreiklangübung zu sehen ist, dass ab dem Ende der ausgehaltenen Quinte der Anstieg wesentlich flacher verläuft. Im Gegensatz dazu liegt der Punkt maximaler Beanspruchung für die Atemmuskulatur bei der Tonleiter schon weit davor zum Zeitpunkt der None, also beim höchsten zu singenden Ton. Nur ICO5 steigt nach diesem Punkt in seiner Aktivität noch leicht an.

Beim Schwellton existiert im Bereich kurz nach der maximalen Tonintensität zum Zeitpunkt des beginnenden Decrescendos ein Aktivitätsplateau für die Atemmuskulatur, auf welches nur noch ein leichter Aktivitätsanstieg folgt. Bei Vokalausgleich und Dreiklang ist nach der maximal erreichten Aktivität am Ende der Übung noch ein kurzer und deutlicher Aktivitätsabfall zu sehen. Alle drei Muskeln befinden sich im Verlauf aller Übungen ungefähr auf demselben Aktivitätsniveau. Unter Ihnen zeigt DP jeweils die höchsten Aktivitätswerte. Die maximalen Aktivitäten treten jeweils in Situationen auf, in denen eine mangelnde muskuläre Kontrolle, also eine mangelnde Stütze, ein zu schnelles entweichen der Luft hervorrufen würde. Somit ist die Aktivierung der Atemmuskulatur vor allem in gesangstechnisch schwierigen Passagen von großer Bedeutung, um ein zu schnelles Entweichen der Luft zu verhindern und einen gleichmäßigen Luftstrom während der Phonation zu gewährleisten. Diese Ergebnisse spiegeln die gesangstechnischen Überlegungen bezüglich der Funktion der Atemmuskulatur wider (Husler und Rodd-Marling 1978, Seidner und Wendler 1978). sind aber hier erstmals dokumentiert.

5.1.2.3 Bauchmuskulatur

Für die Aktivität der betrachteten Bauchmuskeln gilt bei allen vier Übungen, dass OI absolut die höchste Aktivitätszunahme zeigt. Er erreicht auch in allen vier Übungen die höchsten anteiligen Muskelaktivitäten (intermuskuläre Koordination) der betrachteten Muskeln. RA hingegen zeigt in allen Übungen jeweils die niedrigsten anteiligen Aktivitäten der Gesamtaktivität im Vergleich zu den betrachteten drei Bauchmuskeln. Diese Aktivitätsverteilung zeigte sich im Prinzip auch bei Floyd (Floyd und Silver 1950). Auffällig im Vergleich zur bei ihm ebenfalls durchgeführten forcierten Expiration ist, dass dort OE die höchsten absoluten Amplituden aufweist, gefolgt von OI und RA. Diese Ergebnisse zeigen noch einmal eindrücklich, dass Expiration und Phonation

während des Singens in ihrer Muskelaktivierung deutlich von einer reinen forcierten Expiration zu unterscheiden sind. Lässt man die Unterschiede in den Aktivitätsniveaus außer Acht, zeigen alle Bauchmuskeln ein der Atemmuskulatur ähnliches Aktivitätsverhalten.

Für die Tonleiter ist im Gegensatz zur Atemmuskulatur aber nur für OE der Punkt maximaler Aktivität schon zum Zeitpunkt der None erreicht. OI und RA steigen auch nach einem steilen Aktivitätsanstieg bis zu diesem Punkt noch leicht bis zum Ende der Übung an. Bis auf die Schwelltonübung ist kurz vor Ende aller Übungen wieder ein Aktivitätsabfall zu sehen. Auch wenn OI absolut die höchsten Aktivierungen aufweist, erreicht seine relative Aktivierung im Vergleich zur Referenzsituation der forcierten Ex- und Inspiration nicht die maximale Beanspruchung von 100%. Bei den Bauchmuskeln ist es nur OE, welcher bei der Dreiklangsübung am Ende relative Aktivitätswerte von 100% und mehr erreicht. Die Sänger waren somit in der Lage, in der willkürlichen nicht sängerischen maximalen Expiration höhere Aktivierungen eines Großteils der Bauchmuskulatur zu generieren. Doch nutzten sie dies in den Gesangsübungen bis auf OE in der Dreiklangsübung nicht aus. Daraus kann man schlussfolgern, dass für eine maximal forcierte willkürliche Expiration die Bauchmuskulatur in weit höherem Maß aktiviert wird, als es für die sängerische Expiration der Fall ist. Dies ist offensichtlich in den unterschiedlichen Koordinationsmustern begründet.

Die anteiligen Aktivitäten an der Gesamtaktivität betrachtend fällt auf, dass sich unter den Bauchmuskeln sowohl der Muskel mit dem höchsten Aktivitätsanteil aller betrachteten Muskeln in allen Übungen (OI) befindet, als auch mit RA einer der Muskeln, der jeweils den niedrigsten Anteil trägt. Daran ist deutlich zu sehen, wie unterschiedlich die unterstützende Funktion der einzelnen Bauchmuskeln für die Phonationsatmung ist.

Frühere Untersuchungen konnten zeigen, dass bei der Phonation während des Sprechens vor allem die lateralen Bauchmuskeln eine deutliche Aktivität zeigten und dass diese sich bei vermindertem Lungenvolumen vergrößerte (Hoit et al. 1988). Unsere Ergebnisse bezüglich der Phonation beim Singen und der ansteigenden Aktivität vor allem am Ende der Phonation bei OI und OE im Gegensatz zu RA unterstützt diese Ergebnisse. Doch ist dabei hervorzuheben, dass OI bei der sängerischen Atmung eine herausragendere Bedeutung zu haben scheint als OE, denn unsere Daten zeigen, dass OE in einem weitaus größeren Maße für eine reine forcierte Expiration von großer Bedeutung zu sein scheint. Das heißt Sänger nutzen während der sängerischen Expiration die lateralen Bauchmuskeln in einem anderen Verhältnis,

als es zum Beispiel Sprecher tun würden. OI hat bei Ihnen eine weitaus größere Bedeutung als es OE hat. Das sind die Ergebnisse, welche sich bei unserer Untersuchung für Gesangsstudenten zeigen. Ob dies vielleicht im technischen Unvermögen begründet ist, auch andere Bereiche der lateralen Bauchmuskulatur mit in die Expiration einzubeziehen, wird sich erst im Verlauf und im Vergleich zu professionellen Sängern abschließend beurteilen lassen.

5.1.2.4 Hals-/Nackenmuskulatur

Die beiden betrachteten Muskeln (SCM, TD) zeigen zwei sehr unterschiedliche Aktivitätsmuster in den vier Übungen. TD weist in allen vier Übungen einen annähernd gleich bleibenden Aktivitätsverlauf auf. Lediglich zu den jeweiligen Phasen hoher gesangstechnischer Beanspruchung während der einzelnen Übungen ist auch für ihn ein Aktivitätsanstieg zu verzeichnen. Allerdings ist dieser wesentlich geringer ausgeprägt als bei den meisten anderen Muskeln. Die Rangzahlverlaufsanalyse seiner Aktivitätswerte erstreckt sich in allen Übungen über einen Bereich von maximal 5 Rangzahlpunkten. Dies ließe einerseits vermuten, dass er keine großen Aktivitätsänderungen über die Übung aufweist, oder unterstreicht, dass andererseits sehr große interindividuelle Unterschiede für das Aktivitätsmuster von TD existieren.

Für SCM zeigt sich im Vergleich zu den bisher und später noch zu betrachtenden Muskeln ein differierendes Aktivitätsmuster. So weist SCM am Beginn aller Übungen jeweils den höchsten anteiligen Aktivitätswert an der Gesamtaktivität aller betrachteten Muskeln auf und fällt danach in den ersten Betrachtungszeiträumen aller vier Übungen ab. Für ihn gibt es in fast allen Übungen keinen isolierten Maximalwert sondern Spitzenwerte zu bestimmten Ereignissen der vier Übungen.

Im Vokalausgleich liegt dieser Spitzenwert am Umschlagpunkt nach den drei ersten hellen Vokalen A-E-I und den darauf folgenden zwei dunklen Vokalen O und U. Beim Dreiklang existieren zwei Spitzenwerte - jeweils zu Beginn und am Ende der gehaltenen Quinte. Auch für die Tonleiter gibt es zwei Spitzenwerte: einmal im Bereich der None, also zu dem Zeitpunkt, bei dem ein Großteil der betrachteten Muskeln ihren maximalen Aktivitätswert erreicht, und zu Beginn des gehaltenen Endtons. Für den Schwellton existiert keine deutliche Aktivitätsspitze sondern ein Aktivitätsplateau im Bereich der maximalen Intensität des Tones, wie es auch für viele andere Muskeln zu beobachten ist. Es ist zu bemerken, dass der Aktivitätsanstieg bei SCM vor und der Abfall nach

einer Aktivitätsspitze/einem Aktivitätsplateau jeweils kürzer und steiler als für die anderen Muskeln ausgeprägt ist.

Man könnte somit postulieren, dass SCM immer kurzfristig dann aktiviert wird, wenn eine Situation mit erhöhtem Stützbedarf auftritt. Aber auch für diesen Muskel ist anzumerken, dass seine Rangzahlen ein schmales Spektrum aufweisen, was, wie bereits bei TD diskutiert, entweder auf eine hohe interindividuelle Varianz oder auf geringe Aktivitätsänderungen hindeutet.

Außerdem fällt auf, dass diese beiden Muskeln mit Abstand jeweils die höchsten relativen Aktivitätswerte im Vergleich zur Referenzmessung mit Werten von oft über 100% erreichen - in der Schwelltonübung bei einzelnen Probanden sogar Werte von über 200%. Diese beiden Muskeln werden also offensichtlich von den Gesangstudenten für die sängerische Atmung mehr beansprucht als bei einer willentlichen maximalen In- oder Expiration. Das unterstreicht, dass bei der Stimmschulung diesen Muskelpartien große Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte, um eine Balance zwischen optimaler Tonproduktion und Überanstrengung zu gewährleisten. In den Vergleichsuntersuchungen mit professionellen Sängern wird es interessant sein zu beobachten, ob diese ähnliche Anspannungsmuster zeigen.

5.1.2.5 Thoraxmuskulatur

Die absoluten und relativen Aktivitäten betrachtend, weisen PM und SA neben RA die niedrigsten Werte aller untersuchten Muskeln auf. Auch bei der intermuskulären Koordination tragen sie am wenigsten zur Gesamtaktivierung bei. Auf niedrigem Aktivierungsniveau entspricht ihr Aktivitätsverlauf weitestgehend jeweils dem der Atemmuskulatur. Im Unterschied zu dieser zeigt PM jedoch jeweils am Beginn der einzelnen Übungen einen Aktivitätsabfall.

Auffällig ist, dass die Thoraxmuskulatur in allen Übungen zum Ende hin einen absoluten Aktivitätsanstieg zeigt, dass aber der prozentuale Anteil der beiden Thoraxmuskeln bei Betrachtung der Gesamtaktivität aller Muskeln im Verlauf der einzelnen Übungen immer abfällt, das heißt, dass andere Muskeln zum Ende der jeweiligen Gesangsübungen prozentual mehr Aktivität zeigen.

Beim Schwellton ist bei SA und PM das Aktivitätsplateau zum Zeitpunkt der maximalen Intensität des Tones stärker ausgeprägt als bei den bisher betrachteten Atem-, Bauch-, Hals-, und Nackenmuskeln. Ihre Aktivierung und somit muskuläre Unterstützung lässt

nach diesem Plateau kurz nach, bevor sie zum Ende der Übung hin wieder ansteigt. Beide Muskeln sind also vermutlich nicht dauerhaft an der muskulären Unterstützung zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Luftstromes beteiligt, sondern zum Zeitpunkt großer technischer Beanspruchung und jeweils am Ende der Übung, wenn es wichtig ist, das Restvolumen im Thorax zu kontrollieren. Wenn auch der prozentuale Anteil in der Gesamtmuskulatur sehr niedrig ist, weist das auffällige Aktivitätsmuster auf eine gesangstechnische Bedeutung hin.

5.1.2.6 Tiefe Rückenmuskulatur

Sowohl MF als auch QL zeigen zum Beginn aller Übungen einen deutlich sichtbaren Aktivitätsverlust. Erst danach ist für beide ein Aktivitätsanstieg bis zum jeweiligen Beanspruchungshöhepunkt der einzelnen Übungen feststellbar. Es ist also zu vermuten, dass sie zum Zeitpunkt des Tonansatzes eine Bedeutung für die muskuläre Stütze haben, diese dann aber in den Hintergrund und erst bei vermehrtem gesangstechnischem Anspruch wieder hervor tritt. Deutlich zu sehen ist dies sowohl bei der Tonleiter als auch beim Schwellton.

In der Tonleiter zeigen beide zum Zeitpunkt der Note ihre maximale Aktivität, um danach deutlich abzufallen. Auch beim Schwellton ist der Aktivitätsverlust nach dem Plateau zum Zeitpunkt der maximalen Intensität des Tones sehr deutlich nachweisbar. Für MF ist dieser Aktivitätsverlust neben SCM am deutlichsten ausgeprägt. Bei Betrachtung der prozentualen Aktivitätsanteile fällt auf, dass sie neben der Hals- und Nackenmuskulatur gerade zum Beginn der einzelnen Übungen die höchsten Anteile tragen. Sie sind also besonders zum Beginn der Übungen also für die muskuläre Unterstützung im Ansatz des Tones von Bedeutung.

Beide Muskeln verhindern also durch ihre funktionell anatomischen Wirkungsweisen zum Beginn einer Gesangspassage nach einer Inspiration das vorzeitige Zusammensinken der LWS (MF) und der unteren Thoraxapertur (QL). Die metaphorische gesangspädagogische Anweisung „aus dem unteren Rücken“ stützen, könnte mit diesen Ergebnissen eine Erklärung finden. Die erhobenen Befunde wären damit die erste wissenschaftliche Unterlegung dieser gesangspädagogischen Aussagen.

5.1.2.7 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Die oberflächlichen Rückenmuskeln zeigen jeweils ein Aktivierungsmuster, welches auf einem niedrigeren Niveau dem der Atem- und Bauchmuskulatur entspricht. Diese Ergebnisse gehen konform mit den Befunden von Cholewicki (Cholewicki et al. 2002), welche eine Korrelation zwischen intrathorakalem und intraabdominellen Druck, erzeugt durch die Atem- und Bauchmuskulatur während der Inspiration auf der einen Seite und der Aktivität der stammnahen Muskulatur, und damit auch der oberflächlichen Rückenmuskulatur, auf der anderen Seite dokumentieren. Auffällig beim Vokalausgleich verhält sich EL, welcher zum Beginn einen Aktivitätsabfall und erst dann einen Aktivitätsanstieg zeigt, im Gegensatz zu den anderen betrachteten Rückenmuskeln, welche von Beginn an in ihrer Aktivität kontinuierlich ansteigen. Beim Dreiklang und bei der Tonleiter ist es dagegen nur EI, welcher als einziger einen der Atemmuskulatur vergleichbaren Anstieg der Aktivität von Beginn an zeigt. EL und LD zeigen zu Beginn jeweils einen flacheren Anstieg oder sogar einen leichten Aktivitätsabfall. Bei der Schwelltonübung ist für alle Rückenmuskeln sowohl der Aktivitätsabfall zu Beginn als auch nach dem Aktivitätsplateau bei maximaler Tonintensität stärker ausgeprägt als bei der Atemmuskulatur. Insgesamt ist zu sehen, dass auch die oberflächlichen Rückenmuskeln während der Phonation eine unterstützende Funktion haben, um dem steigenden intraabdominellen Druck durch die Stabilisierung der Wirbelsäule entgegenzuwirken. Dies zeigt sich in den der Atemmuskulatur ähnelnden Koordinationsmustern.

5.1.2.8 Zusammenfassende Überlegungen für die Phonation

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass insbesondere die Muskelgruppen der Atem- und Bauchmuskulatur mit ihrer konstanten Aktivitätssteigerung die Phonation unterstützen. Diese beiden Muskelgruppen tragen in jeder der untersuchten Übungen gemeinsam den größten Anteil an der muskulären Gesamtaktivität und stellen damit, wie erwartet, die wesentlichen Stützmuskeln während der Phonation dar. Besonders die hohen anteiligen Aktivitätsniveaus von OI unterstützen die schon erwähnten Ergebnisse von Thorpe (Thorpe et al. 2001) bezüglich einer effektiven Stütze für das Singen aus den lateralen Bauchmuskelbereichen.

Eine andere Gruppe von Muskeln weist zwar ähnliche Aktivitätsmuster auf, diese unterscheiden sich aber vor allem darin, dass ihre Aktivitätsanstiege geringer, die Abfälle nach diesen Anstiegen dafür aber deutlicher ausgeprägt sind. Sie werden vor allem bei gesangstechnisch anspruchsvollen Passagen mit in die Stützfunktion eingebunden und danach schneller wieder entspannt. Zu diesen Muskeln gehören vor allem die Thoraxmuskulatur und die oberflächliche Rückenmuskulatur. Die Aktivitätssteigerung dieser Muskeln hält die Wirbelsäule in aufrechter Position und wirkt damit dem zu schnellen Entweichen der Luft des Ausatemstromes während der Phonation entgegen (Hodges und Gandevia 2000).

Die tiefe Rückenmuskulatur übernimmt vor allem die Stützfunktion im Moment des Tonansatzes, da beide untersuchten Muskeln zu Beginn jeder Übung auf einem hohen Aktivierungsniveau starten, um danach teils deutlich in ihrer Aktivität abzufallen. Dieses Aktivierungsmuster belegt erstmalig die oft benutzte Formulierung "aus dem unteren Rücken stützen".

SCM hingegen zeigt immer dann Aktivitätssteigerungen, wenn sich eine deutliche Änderung in der Tonmodulation ergibt. Sei es beim Übergang von helleren in dunklere Vokale, beim Wechsel von ansteigender Tonhöhe in einen zu haltenden Ton und umgekehrt, beim Wechsel der aufsteigenden in die absteigende Tonleiter und beim Wechsel von crescendo in diminuendo. Er ist also ein Modulationsmuskel der punktuelle Aktivitätssteigerungen zu Zeitpunkten zeigt, an denen Änderungen in der Tonerzeugung erforderlich sind. Dies geht konform mit ersten Befunden, die zeigen konnten, dass die Aktivität von SCM mit der zu singenden Tonhöhe korreliert (Pettersen 2005).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Pettersen (Pettersen und Westgaard 2002, Pettersen und Westgaard 2004b) konnte bei den hier untersuchten Studenten keine deutliche Aktivitätszunahme für TD über den Verlauf der Übungen nachgewiesen werden, die es rechtfertigen würden, ihn als akzessorischen Expirationsmuskel zu bezeichnen. Auffällig ist für diesen Muskel jedoch, dass das zwar relativ gleich bleibende Aktivitätsniveau im Vergleich zur Referenzmessung in jeder Übung über dem 100% Wert lag. Das heißt, die Gesangsstudenten haben TD in der Situation des Singens mehr aktiviert als in einer willkürlichen In- bzw. Expiration. Ob dies aber ein Zeichen für eine unökonomische Anspannung oder physiologische Hilfe zur muskulären Unterstützung für die Phonation ist, lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten. Die Tatsache, dass durch Biofeedback eine Senkung der Aktivität von TD ohne Einfluss auf

die Tonqualität des Gesangs möglich ist (Pettersen und Westgaard 2004b, Pettersen et al. 2005), würde allerdings eher für eine unökonomische Anspannung sprechen.

Auch SCM befindet sich in allen Übungen auf einem hohen relativen Aktivierungsniveau im Vergleich zur Referenzsituation. Somit ist auch seine physiologische Bedeutung als muskulärer Unterstützer der Phonation zu diskutieren. Auch seine Aktivität ließ sich durch Biofeedback senken, was für einen unökonomischen Gebrauch sprechen würde. Im Gegensatz zu TD änderte sich dabei aber sein Aktivitätsmuster nicht. Daher ist seine Bedeutung als unterstützender Muskel der Phonation wahrscheinlich. Er wird aber oft in einem höheren Maße aktiviert, als es unter ökonomischen Gesichtspunkten ausreichend wäre.

Da beide Muskeln aufgrund ihrer funktionell anatomischen Lage Einfluss auf den oberen Thorax und den Schulterbereich haben und gerade die Anspannung oder auch Verspannung in diesem Bereich aus gesangstechnischer Sicht zu vermeiden ist, wäre es im Verlauf der weiteren Untersuchungen interessant zu sehen, ob die Studenten durch ihre weitere Ausbildung in der Lage sein werden, diese Aktivierungsmuster zu ändern und ob professionelle Sänger andere Aktivierungsmuster für SCM und TD aufweisen.

5.2 Fragestellungen der Einleitung

5.2.1 Hypothese 1:

Männliche und weibliche Probanden zeigen starke Unterschiede in ihren muskulären Koordinationsmustern und die Frauen zeigen grundsätzlich höhere muskuläre Beanspruchungsniveaus.

5.2.1.1 Relativ zur Referenz

Für die Unterscheidung zwischen männlichen und weiblichen Probanden wurden drei verschiedene Bezugsgrößen gewählt. Bezogen auf das Referenzmaximum jedes Muskels zeigt sich, dass die Frauen sowohl in der Inspiration als auch in allen Übungen bis auf Ausnahme einzelner Muskeln immer ein höheres relatives Aktivierungsniveau erreichen. Dies kann nun verschiedene Ursachen haben. Möglicherweise sind Frauen im Gegensatz zu den Männern in der Referenzsituation weniger in der Lage, willkürlich forciert zu in- oder expirieren. Eine andere Erklärung wäre, dass das Singen bei

Frauen eine höhere muskuläre Beanspruchung als für die männlichen Probanden bedeutet. Das könnte in der im Durchschnitt stärkeren physiologischen Muskelkraft der männlichen Probanden begründet sein (Abe et al. 2003). Für die Einatemphase ist auffällig, dass es besonders der Anfangsbereich ist, in dem diese Unterschiede zwischen Männern und Frauen deutlich hervortreten, die Frauen also jeweils auf einem höheren Beanspruchungsniveau beginnen als die Männer. Die signifikanten Unterschiede liegen hier vor allem bei Teilen der Atemmuskulatur und der Rückenmuskulatur.

Unter den wenigen Muskeln, welche bei den Männern ein höheres Beanspruchungsniveau erreichen, ist vor allem SCM auffällig. Dieser erreicht am Ende der Einatmung höhere relative Aktivitäten und behält diese Tendenz auch über den Verlauf aller Gesangsübungen bei. Somit ist SCM konstant über alle Übungen einer der wenigen Muskeln, der durch die männlichen Probanden eine höhere Beanspruchung erfährt, auch wenn dieser Unterschied statistisch nicht zu sichern ist. Dies könnte sowohl daran liegen, dass die Frauen diesen Muskel in der Referenzsituation schon mehr in die maximale In- und Expiration einbeziehen, als auch daran, dass dieser Muskel bei den männlichen Probanden einer erhöhten Beanspruchung beim Singen unterliegt.

Im Verlauf der zu singenden Übungen nehmen die Unterschiede bei den Frauen in dem Sinne zu, dass sie vom Vokalausgleich bis zum Schwellton für einige Muskeln signifikant werden. Bei der Tonleiter sind es vor allem die tiefen Rückenmuskeln, welche in einem großen Zeitbereich ein signifikant höheres Beanspruchungsniveau aufweisen. EL und EI der oberflächlichen Rückenmuskulatur, SA der Thoraxmuskulatur sowie DP und ICO 8 der Atemmuskulatur zeigen auch Signifikanz aber nur in kurzen Zeitabschnitten am Ende der Übung. Bei der Schwelltonübung werden diese Zeitbereiche länger und auch LD der oberflächlichen Rückenmuskulatur zeigt nun ein signifikant höheres Beanspruchungsniveau bei den weiblichen Probanden. Auffällig ist, dass diejenigen Muskeln, welche bei den Frauen signifikant höhere und bei den Männern tendenziell höhere Aktivierungsniveaus aufzeigen, sowohl in der Einatmung als auch in der Phonation dieselben sind.

Die Gesangsstudentinnen scheinen im Vergleich zu den Studenten vor allem gegen Ende von Tonleiter- und Schwelltonübung über die Beanspruchung einer Vielzahl von Muskeln eine größere Unterstützung im Bereich der Rückenmuskulatur aufzubauen, um bei gestreckter Wirbelsäule den Thorax aufrecht zu halten und einen ausreichenden Luftstrom zu generieren. Wohingegen die Sänger über die gesamten Übungen hinweg

vor allem SCM der Nackenmuskulatur in einem ausgeprägteren Rahmen zur Stabilisierung des oberen Thorax hinzuziehen.

5.2.1.2 Atemmuster

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Probanden bezüglich der muskulären Unterstützung der Weitung im oberen Thoraxbereich beim Singen widerspiegeln sich auch in der Tatsache, dass beim Vergleich der Bänderdehnungen die Männer in allen Übungen im Band 1, also dem Band um den oberen Brustkorb, weitere relative Dehnungswerte im Vergleich zur nicht sängerischen maximalen Inspiration aufzeigen als die Frauen. Wobei auch hier die Frage zu stellen ist, ob es wirklich eine stärkere Dehnung ist, oder ob die Frauen während der Kalibrierungsmessung stärker forciert in diese Bereiche aus- und eingeatmet haben und somit höhere Referenzwerte bei den Frauen zustande gekommen sind. Diese Überlegung ist allerdings eher theoretischer Natur, da die Verfasserin bei den Untersuchungen zugegen war und aus dem Erleben heraus bestätigen kann, dass alle Teilnehmer den entsprechenden Aufforderungen motiviert nachgekommen sind.

Signifikant höhere Dehnungswerte sind bei den Männern für das Atemband um den Bauch besonders bei Beginn der Einatmung und in den mittleren Bereichen von Dreiklang und Tonleiter zu sehen. Dies lässt die Interpretation zu, dass Männer beim Singen ausgeprägtere Bauchatmer sind. Frauen hingegen weisen sowohl in der Inspiration als auch in den Übungen über große Zeitabschnitte weitere Dehnungen im Bereich des zweiten Atembandes, also im Bereich der Flanken auf, sie sind also ausgeprägtere Flankenatmer. Diese Ergebnisse stehen einer Untersuchung von McCoy (McCoy 2005) teilweise widersprüchlich gegenüber. Bei seiner Befragung von professionellen Sängern zeigte sich einerseits im Vergleich von Männern und Frauen, dass alle den Bereich der Flanken als den wichtigsten im Bezug sowohl auf Inspirations- als auch auf Expirationskontrolle erachteten. Andererseits gaben die weiblichen Probanden an, eine Dehnung im Bereich unterhalb des Nabels (bei uns Band 3) als wesentlich wichtiger zu erachten als ihre männlichen Kollegen. Die Diskrepanz zu unseren Ergebnissen beruht daher offensichtlich auf einem Unterschied zwischen subjektiver Wahrnehmung und objektiver Untersuchung. Konform gehen McCoys (McCoy 2005) Befragungen mit der hier dokumentierten Messung jedoch darin,

dass das subjektive Empfinden der Männer bezüglich der Bedeutung der Weitung im oberen Thoraxbereich (bei uns Band 1) mit unseren objektiven Messergebnissen übereinstimmt.

Im Gegensatz zu Watson (Watson et al. 1990), der keine Unterschiede zwischen Männern und Frauen fand, machen die Befunde zumindest bei Gesangsstudenten deutlich, dass sich Männer und Frauen in Ihren Atemmustern wie beschrieben unterscheiden, und es bleibt zu prüfen, ob sich diese Unterschiede im Verlauf des Studiums angleichen oder verstärken.

5.2.1.3 intermuskuläre Koordination

Durch den Geschlechtervergleich im Hinblick auf die intermuskuläre Koordination ist es möglich zu beurteilen, ob es zwischen männlichen und weiblichen Probanden signifikante Unterschiede in der anteiligen Aktivierung der untersuchten Muskeln gibt.

In allen vier Übungen ist deutlich zu sehen, dass die männlichen Probanden teils über weite Betrachtungszeiträume signifikant höhere anteilige Aktivitäten für EI auf der rechten Körperseite zeigen. Auch für alle anderen oberflächlichen und tiefen Rückenmuskeln außer LD lässt sich eine Tendenz zugunsten der Männer feststellen. Diese lässt sich sowohl auf der linken als auch der rechten Körperhälfte nachweisen, ist auf der Rechten aber wesentlich stärker ausgeprägt. Weiterhin lassen sich Tendenzen erkennen, dass OI der Bauchmuskulatur bei den männlichen Probanden in weiten Abschnitten mehr zur Gesamtaktivität beiträgt als bei den Frauen. Bei ihm ist diese Beobachtung aber im Gegensatz zu den Rückenmuskeln auf der linken Körperseite stärker ausgeprägt. Weitere signifikante Unterschiede zugunsten der Männer in der intermuskulären Koordination sind nicht nachweisbar.

Bei den weiblichen Probanden zeigen sich signifikant höhere Aktivitätsanteile in drei von vier Übungen vor allem bei OE der Bauchmuskulatur. Eine Seitendominanz zur linken Seite in zwei der drei Übungen ist hier auffällig. Signifikant höhere Aktivitäten in kleinen Beobachtungszeiträumen lassen sich für ICO5 der Atemmuskulatur in den ersten beiden Übungen nachweisen.

Für SCM und TD der Hals-/Nackenmuskulatur ergibt sich ein sehr heterogenes und stark von den einzelnen Übungen abhängiges Bild für ihren Anteil an der gesamten Muskelaktivität. Einerseits werden beim Vokalausgleich und beim Schwellton vor allem bei Männern für SCM und TD relativ hohe anteilige Muskelaktivitäten beobachtet.

Andererseits zeigen Frauen beim Dreiklang und der Tonleiter jeweils vor allem am Ende dieser Übungen signifikant höhere anteilige Aktivitäten für SCM und TD. Offensichtlich stellen die Gesangsübungen Vokalausgleich und Schwellton mit konstanter Tonhöhe im Vergleich zu Dreiklang und Tonleiter mit wechselnder Tonfrequenz sehr spezifische Anforderungen an die intermuskuläre Koordination.

Zusammenhänge zwischen der Dauer der einzelnen Übungen und dem damit verbundenen Beanspruchungsniveau sind nicht festzustellen. Deshalb scheint es bedeutsam zu sein, dass Vokalausgleich und Schwellton Übungen sind, bei denen die Tonhöhe unverändert bleibt. Tonleiter und Dreiklang hingegen modulieren in der Tonhöhe. Somit könnte man vermuten, dass die weiblichen Probanden bei modulierender Tonhöhe die beiden betrachteten Nackenmuskeln in einem größeren Maße in die intermuskuläre Koordination mit einbeziehen als bei gleich bleibender Tonhöhe. Aufgrund der Tatsache, dass beide Muskeln für die Phonation und die Erzeugung von Tönen physiologisch keine Bedeutung haben, sondern eher unter erhöhter psychischer Anspannung eine erhöhte Aktivität zeigen (Mathiassen et al. 1995), ist zu vermuten, dass die Modulation der Tonhöhe eine solche Anspannung bei den Studenten erzeugen.

5.2.1.4 Übungsspezifisches Maximum

Bei der vergleichenden Betrachtung zwischen männlichen und weiblichen Probanden hinsichtlich der muskulären Aktivität bezogen auf das jeweilige übungsspezifische Maximum eines Muskels, also die intramuskuläre Koordination über die Übungen hinweg, lässt sich die Statistik ohne Kenntnis der jeweiligen Amplitudenverlaufskurven nicht beurteilen. Auf der Grundlage dieser Verlaufskurven lassen sich die Unterschiede bezogen auf die maximale muskuläre Aktivität innerhalb einer Übung dahingehend interpretieren, ob die Phasizität der Aktivitätsverlaufskurven der einzelnen Muskeln bei Frauen oder Männern mehr ausgeprägt ist. Generell hohe Aktivitätswerte in Bezug auf das erreichte Maximum in einer Übung würden dabei für eine geringer ausgeprägte Phasizität, also geringere Unterschiede zwischen minimalem und maximalem Aktivierungswert bezogen auf das in der jeweiligen Übung generierte Maximum sprechen.

Über alle Übungen hinweg lässt sich ein teils sogar über große Strecken signifikant höheres intramuskuläres Beanspruchungsniveau für SCM der Atemmuskulatur bei den

Männern nachweisen. Dieser Muskel zeigt also bei den männlichen Probanden eine geringere Phasizität über die Übungen hinweg. Am auffälligsten ist ein kontinuierlich hohes Beanspruchungsniveau beim Dreiklang.

Für die erste Übung, den Vokalausgleich, ist für OI und OE der Bauchmuskulatur auf Seiten der Frauen eine geringere Phasizität der Verlaufskurve zu erkennen. Ebenfalls fallen für DP und ICO8 der Atemmuskulatur bei den weiblichen Probanden signifikant höhere Aktivitätswerte auf. Die Frauen erreichen bei Betrachtung der Verlaufskurven schon zeitig im Übungsverlauf relativ zum Maximum am Ende der Übung signifikant höhere Werte als die männlichen Probanden, was bei den Frauen für geringere Phasizitäten innerhalb der Übung spricht.

Bei der Dreiklangsübung ist das gleiche Phänomen schon zum Beginn der Übung feststellbar. Allerdings ist auffällig, dass davon bei beiden Übungen nur die rechte Körperhälfte betroffen ist. ICO 5 zeigt das übungsspezifische Maximum dagegen erst gegen Ende der Dreiklangsübungen.

Zusätzlich gibt es in den einzelnen Übungen punktuelle signifikante Unterschiede bezüglich der intramuskulären Koordination. Dabei fällt auf, dass es jeweils die weiblichen Probanden sind, bei denen man aufgrund signifikant höherer Werte auf eine geringere Phasizität in diesem Bereich schließen kann, und dass dies auf der rechten Körperseite oft ausgeprägter ist. Zeitlich fallen die Bereiche mit Signifikanz jeweils auf den Zeitraum kurz nach dem übungsspezifischen Maximum, woraus geschlussfolgert werden kann, dass die weiblichen Probanden in diesen Fällen nach dem Maximum einen geringeren Aktivitätsverlust zulassen als die männlichen Probanden.

Für die Phase der Inspiration sind nur wenige signifikante Unterschiede zu sehen. Die vergleichende Auswertung der statistischen Daten und Betrachtung der Aktivitätsverlaufskurven lässt vermuten, dass die weiblichen Probanden für ICO8 einen geringeren Aktivitätsverlust zu Beginn der Einatemphase zeigen und dass auch der Aktivitätsverlust bei OE geringer ausfällt. Für die männlichen Probanden sind signifikant höhere Aktivierungsniveaus am Ende der Einatemphase für ICO5 und MF auf der rechten Körperseite zu sehen. Dies spricht neben den tendenziell höheren Werten bei fast allen Muskeln am Ende der Inspiration dafür, dass die männlichen im Vergleich zu den weiblichen Probanden nach Erreichen der jeweiligen Aktivitätsmaxima bei diesen Muskeln einen teils sogar signifikant geringeren Aktivitätsabfall zeigten.

5.2.1.5 Zusammenfassung

Männer und Frauen zeigen keine grundlegenden Unterschiede bezüglich ihrer inter- und intramuskulären Koordinationsmuster. Jedoch gibt es einzelne Muskeln, welche sich in ihrer Aktivität bezogen auf die verschiedenen Bezugsparameter signifikant unterscheiden. Dies betrifft aber jeweils spezifische Muskeln zu spezifischen Zeitpunkten.

Für das Beanspruchungsniveau lässt sich zusammenfassend sagen, dass die weiblichen Probanden bis auf Ausnahme von SCM in allen Gesangsübungen ein tendenziell höheres Beanspruchungsniveau zeigen, welches für einige Muskelgruppen über den Verlauf der Messung Signifikanz erreicht. Wie schon oben beschrieben, ist als Erklärung sowohl eine höhere Beanspruchung bei den Frauen zum Ausgleich anatomischer Unterschiede, unter Umständen mangelndes „Training“, oder auch eine nicht adäquat durchgeführte Referenzmessung möglich. Auch kann ein Zusammenhang mit der Generierung der Maximalwerte sowohl in der In- als auch Expirationsphase bestehen (siehe 5.4.1).

5.2.2 Hypothese 2:

Die Studenten sind noch nicht in der Lage für die sängerische Einatmung ein reproduzierbares Atem- und muskuläres Koordinationsmuster zu präsentieren

Bezug nehmend auf die schon im Ergebnisteil beschriebene Reliabilitätsanalyse (siehe auch Tabelle 34 Anhang), lässt sich aufgrund der guten bis sehr guten Reliabilität vor allem für die Bänderdehnungen, für die Muskelaktivitäten bezogen auf die Absolutwerte und für die intermuskuläre Koordination schlussfolgern, dass die Studenten schon zum Beginn ihrer Ausbildung entgegen den Erwartungen in der Lage sind, ein vergleichbares Bild sowohl bei den Atemmustern als auch bei der Muskelkoordination zu zeigen. Für die Reliabilität der Atemmuster gehen diese guten Daten konform mit den Ergebnissen von Thomasson (Thomasson und Sundberg 2001), der auch ein sehr konstantes Atemmuster bezüglich der Inspiration in unterschiedlichen Gesangssituationen fand. Somit ist die sängerische Inspiration schon zu diesem frühen Zeitpunkt der Ausbildung ein Vorgang, welcher von den Studenten insoweit kontrolliert ausgeführt wird, dass sich für alle vier Übungen ein wiederholbares Bild in Bezug auf

muskuläre Aktivität und Atemmuster ergibt. Ob dieses allerdings ein geeignetes und somit über die weiteren Jahre der Ausbildung stabiles Muster darstellt, wird im Verlauf des Projektes zu klären sein, ebenso wie die Frage, ob sich die Atemmuster deutlich zugunsten einer costo-abdominalen Atmung verändern und ob es den Studenten gelingt, die Weitung in diesem Bereich bis an das Ende der Inspiration auszudehnen. Auch die Frage nach einem ökonomischeren Einsatz vor allem von SCM wird erst in weiteren Verlaufsuntersuchungen zu beantworten sein. Ebenfalls noch offen ist, ob sich die von den Studenten etablierten muskulären Einatemmuster von denen professioneller Sänger unterscheiden und wenn ja, ob es im Verlauf des weiteren Studiums gelingt, diese Unterschiede auszugleichen. Untersuchungen mit dieser Fragestellung sind derzeit in der Literatur noch nicht existent.

5.2.3 Hypothese 3:

Im Verlauf der Untersuchung tritt über die Übungen hinweg eine muskuläre Ermüdung ein, die sich darin äußert, dass das Beanspruchungsniveau der einzelnen Muskeln über den zeitlichen Verlauf ansteigt.

Alternativhypothese: Es ist keine Ermüdung über die Untersuchung hinweg zu sehen. Die Höhe des Beanspruchungsniveaus ist abhängig von der zeitlichen Dauer der einzelnen Übung.

Für eine Beurteilung des Beanspruchungsniveaus im Verlauf der Untersuchung eignet sich eine Betrachtung der statischen Bereichsdaten der vier Übungen und dabei besonders die Betrachtung der relativen Aktivierung im Vergleich zur Referenzsituation für die Anfangs- und Endbereiche der Übungen (Abbildung 5, Abbildung 10, Abbildung 14, Abbildung 18). Für Vokalausgleich, Dreiklang und Schwellton existiert jeweils solch ein prozentualer Aktivitätswert im Vergleich zur Referenzmessung für den Anfangs- und Endbereich, für die Tonleiter nur für den Endbereich. Würde man einen deutlichen Anstieg der relativen Aktivität im Vergleich zur Referenzmessung, also eine Erhöhung des Beanspruchungsniveaus über die Untersuchung hinweg sehen können, so wäre dies als deutliches Zeichen für eine einsetzende Ermüdung zu werten (Luttmann et al. 1996). Um dies nachzuweisen wurden die relativen Amplitudenwerte aller Muskeln jeweils für den Anfang und das Ende aller betrachteten Übungen untereinander mittels Friedman-Test verglichen (Tabelle 33 Anhang). Beim Vergleich der sich daraus ergebenden mittleren Rangzahlen für die Anfänge der Übungen sieht man, dass es

keinen kontinuierlichen Anstieg des Beanspruchungsniveaus über den Verlauf der gesamten Untersuchung gibt.

Signifikante Unterschiede zwischen zwei Anfangsbereichen ergeben sich bei einem Unterschied der Rangzahlen von 0,69. Es ist zu sehen, dass es zwar signifikante Unterschiede zwischen den Rangzahlen der einzelnen Anfangsbereiche gibt, jedoch keine kontinuierliche Zunahme der Rangzahlen zum Ende der Untersuchung hin. Vielmehr ist auffällig, dass der im Vergleich höchste relative Amplitudenwert für fast alle Muskeln in der Dreiklangübung, der zweiten Übung, generiert wird. Dagegen nimmt zum Ende der Untersuchung, also bei den letzten Übungen, das Beanspruchungsniveau bei allen Muskeln ab und erreicht oft sogar niedrigere Werte als in der ersten Übung. Lediglich TD zeigt zum Beginn der letzten, der Schwelltonübung, sein höchstes Beanspruchungsniveau, jedoch ist dieser Unterschied für TD zu den Anfangsbereichen der anderen Übungen statistisch nicht signifikant.

Aussagekräftiger in Bezug auf die Ermüdung über den Untersuchungsverlauf hinweg ist aber die Frage nach den Beanspruchungsniveaus in den Endbereichen der einzelnen Übungen. Hier muss eine kritische Rangzahldifferenz von 0,98 Punkten ersichtlich sein, um von einem signifikanten Unterschied sprechen zu können. Wieder ist es die Dreiklangsübung in welcher das höchste Beanspruchungsniveau für alle Muskeln, bis auf SCM und TD, generiert wird. Damit ist die Vermutung einer generellen Ermüdung über den Untersuchungsablauf hinweg nicht zu bestätigen. Vielmehr scheint es die Dreiklangsübung zu sein, welche die Gesangsstudenten zur höchsten Beanspruchung im Vergleich zur Referenzsituation zwingt. Bei der Tonleiter, der dritten Übung, ist dann wieder bei fast allen Muskeln eine deutliche Abnahme der Beanspruchung zu sehen. Diese ist bei den meisten Muskeln im Vergleich zur Dreiklangsübung auch signifikant. Aufgrund des Verlaufes seiner relativen Aktivitäten über alle Übungen mit einem Aktivitätsabfall nach dem Dreiklang ist eine generell zunehmende Ermüdung aber eher unwahrscheinlich.

Für TD zeigt sich beim Vergleich der Endbereiche wiederum das höchste Beanspruchungsniveau in der letzten, der Schwelltonübung. Diesmal ist die Zunahme zwischen erster und letzter Übung für ihn auch signifikant. Schon an vielen Stellen wurde beschrieben, dass eine hohe Aktivität bei TD für eine unökonomische Beanspruchung steht und Zeichen von Verlust der Lockerheit beim Singen anzeigen kann. Die Schwelltonübung stellt nun eine der technisch größten Herausforderungen an eine gesangstechnisch gute Ausführung dar. Somit liegt die Vermutung nahe, dass das erhöhte Beanspruchungsniveau für TD nicht nur ein Zeichen der Übermüdung ist,

sondern auch als unökonomische Aktivierung aufgrund unzureichender technischer Fertigkeiten gewertet werden kann.

Auch SCM zeigt, wie schon erwähnt, seine maximale Beanspruchung nicht in der Dreiklangsübung. Bei ihm wird dieses Maximum bei der Tonleiter, also der vorletzten Übung, generiert. Für diesen Muskel könnte man also eine übungstechnisch bedingte Beanspruchung postulieren. Wie schon unter 5.1.2.4 beschrieben, ist SCM ein Muskel, welcher bei erhöhtem Stützbedarf eine starke Aktivität aufweist. Nun stellt die Tonleiter, aufgrund ihres, im Staccato gesungenen Verlaufs eine besondere Herausforderung an eine immer wieder neu aufzubauende Stütze dar. Somit ist vielleicht zu erklären, warum SCM im Endbereich der Tonleiter sein höchstes Beanspruchungsniveau im Untersuchungsverlauf zeigt.

Um die Alternativhypothese zu prüfen, ist ein Vergleich der zeitlichen Dauer der einzelnen Übungen nötig. Dabei zeigt sich, dass die vier Übungen bezüglich ihrer Dauer in zwei Gruppen zu unterteilen sind (Tabelle 32 Anhang). Auf der einen Seite Vokalausgleich und Tonleiter und auf der anderen Seite Dreiklang und Schwellton. Erstere haben bei allen Probanden die kürzere Dauer, Dreiklang- und Schwelltonübung sind deutlich länger. Es sind auch Dreiklang und Schwellton, bei denen üblicherweise die höchsten Beanspruchungsniveaus erzeugt werden. Offensichtlich ist das Beanspruchungsniveau abhängig von der Dauer der einzelnen zu singenden Übung. Sowohl bei der Betrachtung der mittleren Dauer der Übung für jeden einzelnen Probanden als auch im Mittelwert und im Median über die gesamte Stichprobe ist zu sehen, dass von Dreiklang und Schwellton der Schwellton die längere Dauer aufweist. Das höchste Beanspruchungsniveau weist allerdings fast ausnahmslos die Dreiklangsübung auf. Damit sind es wahrscheinlich gesangstechnische Herausforderungen, die neben der Dauer der Übung das zu generierende Beanspruchungsniveau der Muskeln bestimmen. Eventuell sind diese in der höheren zu singenden Tonfrequenz im Bereich der Quinte zu finden, sodass die Beanspruchung, die mit dieser technischen Herausforderung verbunden ist, die formale Beanspruchung aufgrund der Länge überwiegt. .

Um genau differenzieren zu können, ob erhöhte relative Aktivitätswerte auf einen höheren Beanspruchungsgrad oder eine Ermüdung zurückzuführen sind, wäre eine Frequenzanalyse erforderlich (Luttmann et al. 1996). Aufgrund des Verlaufs der Beanspruchungsniveaus über die vier Übungen mit einem Maximum beim Dreiklang und einem danach zu sehenden Rückgang sowie aufgrund des sichtbaren Zusammenhangs zwischen Übungslänge und muskulärer Beanspruchung ist jedoch

eine generelle Ermüdung innerhalb einer Übung als Auslöser unwahrscheinlich und daher solch eine Frequenzanalyse verzichtbar.

5.2.4 Hypothese 4:

Die Koordinationsmuster der Phonation zeigen eine starke interindividuelle Varianz

Eine Aussage darüber, inwieweit die muskulären Koordinationsmuster der Gesangsstudenten sich interindividuell unterscheiden, gestattet der Vergleich der Mediankurven der Aktivitätswerte mit den Rangzahlverläufen. Die Verlaufskurve der Medianwerte der Muskelaktivitäten stellt eine Mittelung der Muskelaktivitäten über alle Probanden dar und vermittelt so einen Eindruck darüber, wie sich dieser Aktivitätsverlauf bei einem Großteil der Studenten abspielt. Die Verlaufskurve der Rangzahlen hingegen gibt an, wie sich die zeitliche Abfolge der Muskelaktivität bei den Studenten entwickelt (siehe 3.5.3). Die ermittelten Rangzahlen erlauben eine Einschätzung darüber, ob die Verlaufskurven der Muskelaktivitäten bei den Studenten annähernd übereinstimmen oder sich stark unterscheiden. Würden immer glatte Rangzahlen (1, 2, 3, etc.) zu sehen sein, hieße dies, dass die Charakteristik der Verlaufskurven bei allen Studenten identisch wäre. Allerdings würde das neben der interindividuellen Übereinstimmung auch innerhalb der Situation sich eindeutig voneinander unterscheidende Werte erfordern. Daher kann allein anhand der Rangzahlen keine eindeutige Varianzaufklärung erfolgen. Jedoch erlaubt der Vergleich zwischen Mediankurve und Rangzahlkurve eine Einschätzung darüber, ob sich die Verlaufscharakteristiken der Muskelaktivitäten bei den Studenten ähneln oder unterscheiden.

Wenn starke interindividuelle Unterschiede im muskulären Aktivitätsverlauf für einen Muskel existieren, würde trotz einer eindeutigen Verlaufstendenz in der Mediankurve im Verlauf der Rangzahlen keine solche Tendenz zu sehen sein. Sind dagegen für die Mediankurven kaum Schwankungen nachweisbar, während die Rangzahlverläufe signifikante Unterschiede zeigen, so sind selbst diese geringen Schwankungen in den Mediankurven als systematischen Veränderungen bei allen Studenten anzusehen. Wenn allerdings sowohl Median- als auch Rangzahlverlaufskurve keine großen Schwankungsbreiten aufweisen, zeigt die Aktivität des betreffenden Muskels über den Betrachtungszeitraum hinweg keine systematischen Änderungen. (Die folgenden

Ausführungen beziehen sich jeweils auf die Ergebnisse welche in Abbildung 24, Abbildung 26, Abbildung 28 und Abbildung 30 dargestellt sind.)

Sowohl für die Atem- als auch die Bauch- und die oberflächliche Rückenmuskulatur entsprechen sich die Median und Rangzahlverlaufskurven in allen vier Übungen weitgehend. Somit gibt es für diese Muskelgruppen keine große Varianz bezüglich der muskulären Koordination innerhalb der Probandengruppe. Die in den Mediankurven ersichtlichen Tendenzen des Aktivitätsverlaufes bestätigen sich in der Analyse des Rangzahlenverlaufs und zeigen sich dort sogar als signifikant beschriebene Unterschiede in der Verlaufsbeurteilung (siehe Kapitel 4.2). Damit gelten für diese Muskelgruppen für alle Studenten einheitliche Koordinationsmechanismen.

Für die tiefe Rückenmuskulatur zeigen sich unterschiedlich ausgeprägte Übereinstimmungen zwischen Mediankurven und Rangzahlkurven in den vier Übungen. In der Dreiklangsübung ist sofort deutlich, dass aufgrund eines annähernd gleichenden Verlaufs der beiden betrachteten Kurven keine große interindividuelle Varianz zu vermuten ist. Dagegen sind bei Vokalausgleich und Tonleiter in der Mediankurve keine großen Aktivitätsänderungen zu sehen, die dazugehörigen Rangzahlverläufe der beiden Muskeln QL und MF zeigen aber unterschiedliche Übereinstimmungen zur Median-Verlaufskurve.

Für QL sind bei Vokalausgleich und Tonleiter trotz geringer Schwankungen in den Medianen signifikante Rangzahländerungen nachweisbar, woraus zu schließen ist, dass selbst die geringen Änderungen der Mediankurven systematisch bei allen Studenten in den Verlaufskurven vorhanden sind. Die Rangzahlunterschiede beruhen also nicht auf interindividuellen Unterschieden. In der Schwelltonübung sind für QL einander ähnelnde Median und Rangzahlkurven zu beobachten. Dies spricht auch in dieser Übung für eine geringe interindividuelle Varianz.

Dagegen zeigt die Rangzahlverlaufskurve für MF in diesen bei Vokalausgleich und Tonleiter wie auch die Mediankurve keine große Schwankungsbreite. Dieser Muskel unterliegt in diesen beiden Übungen also entweder einer großen interindividuellen Varianz oder er weist über den Verlauf der Übungen keine großen Aktivitätsunterschiede auf. Betrachtet man vergleichend die Schwelltonübung, ist für MF neben einer Mediankurve mit geringer Schwankungsbreite eine Rangzahlkurve mit signifikanten Änderungen über den Schwellton zu sehen. Damit gilt für MF in dieser Übung offensichtlich die schon oben für QL gemachte Feststellung bezüglich der Übungen Vokalausgleich und Tonleiter. Daher und aufgrund der Tatsache, dass für alle

anderen Muskeln nur eine geringe Varianz nachweisbar ist, ist eine lediglich bei Vokalausgleich und Tonleiter vorliegende interindividuelle Varianz unwahrscheinlich. Für die Thoraxmuskulatur sind nur in der Schwelltonübung sich entsprechende Schwankungsbreiten sowohl im Median als auch in den Rangzahlen zu sehen. In den anderen drei Übungen zeigen die Mediankurven jeweils weniger ausgeprägte Aktivitätsänderungen, als sich dann bei Betrachtung der Rangzahlen ergeben. Insgesamt ist dadurch aber für alle vier Übungen eine geringe Varianz der Muskelaktivitätsverläufe wahrscheinlich. In den Übungen Vokalausgleich, Dreiklang und Tonleiter zeigt sich zudem, dass selbst die nur kleinen Auslenkungen in den Mediankurven bei allen Studenten systematisch und deutlich ausgebildet sind. Betrachtet man die beiden untersuchten Thoraxmuskeln getrennt, so ergeben sich für deren Aktivierungsmuster allerdings unterschiedliche Charakteristika: SA zeigt sich entsprechende, deutliche Änderungen in Median und Rangzahlkurve und somit eine geringe Varianz unter den Probanden. PM hingegen zeigt in der Mediankurve eher geringe Änderungen in der Aktivität, in den Rangzahlen sind diese aber deutlich und zeigen Signifikanz. Seine Änderungen sind damit bei allen Probanden systematisch ausgeprägt, zeigen also ebenfalls eine geringe Varianz. Im Gegensatz zur aufgestellten Hypothese weisen damit die Koordinationsmuster der Phonation keine großen interindividuellen Varianzen zwischen den Studenten auf.

5.3 Fehlerbetrachtungen

5.3.1 Probanden

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wurden die Probanden für unsere Untersuchung nach ihrem studentischen Ausbildungsstand ausgewählt. Das einzige zu erfüllende Kriterium war das gerade aufgenommene Gesangsstudium an einer der erwähnten Musikhochschulen. In der Tabelle 1 sieht man in der letzten Spalte, dass schon zu diesem Zeitpunkt Unterschiede in Bezug auf die Vorerfahrung bezüglich einer klassischen Gesangsausbildung bestehen. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es herauszufinden, ob die Gesamtheit der Probanden zum Beginn des Studiums bereits etablierte muskuläre Koordinationsmuster besitzt. Ob die Differenzen bezüglich der teilweise bereits erhaltenen klassischen Ausbildung Unterschiede in den muskulären Koordinationsmustern hervorrufen, ist aus den vorliegenden Daten nicht ersichtlich.

Allerdings ist in Abschnitt 5.2.4 erläutert, dass keine großen interindividuellen Varianzen in den Koordinationsmustern existieren. Somit kann ein deutlicher Einfluss der bereits vor Studienbeginn erhaltenen klassischen Gesangsausbildung weitgehend ausgeschlossen werden. Des weiteren bestehen Unterschiede im Hinblick auf Körpergröße, Gewicht und den damit errechneten BMI (Body-Mass-Index). Das mit einem erhöhten Body-Mass-Index oft einhergehende stärker ausgeprägte subkutane Fettgewebe hat natürlich Einfluss auf die registrierten Muskelaktivitäten durch die OEMG-Messung (Lowery et al. 2002). Durch eine Normierung auf probandenspezifische Referenzgrößen (Referenz-Maximum, übungsspezifisches Maximum, relativer Anteil an der muskulären Gesamtaktivität) und die dadurch generierten relativen Aktivitätswerte ist eine Vergleichbarkeit trotzdem gegeben und entstehende Fehler aufgrund der physiologischen und anatomischen Unterschiede der Probanden können damit so weit wie möglich minimiert werden (Mathiassen et al. 1995).

5.3.2 Untersuchungsaufbau

Um eine gute Vergleichbarkeit aller Daten zu erreichen und um Störsignale nicht untersuchter Muskeln zu minimieren, wurden die Probanden in einer stehenden Position mit locker herabhängenden Armen untersucht. Schon während der Messungen zeigte sich, dass diese Position nicht von allen Studenten als angenehm empfunden wurde. Viele würden unabhängig von den Untersuchungsbedingungen die Arme in viel stärkerem Ausmaß in das Singen einbeziehen. Einige mussten während der Messungen darauf hingewiesen werden, dies zu unterlassen. Daher ist für diese Probanden zu vermuten, dass die doch sehr statische Körperhaltung Einfluss auf die Gesamtaktivität der Muskulatur während des Singens hatte. Inwieweit dies Einfluss auf die Messergebnisse der in der Arbeit betrachteten Muskeln hatte, ist allerdings nicht zu bestimmen. Der von uns gewählte Aufbau sollte mit seinen identischen äußeren Bedingungen über alle Übungen hinweg dazu dienen, die Messergebnisse der Probanden untereinander vergleichbar zu machen. Da aufgrund der Aufzeichnung der Messungen mittels einer Digitalkamera größere Abweichungen von der gewünschten Haltung auch während der Auswertungen noch einmal überprüft und ausgeschlossen werden konnten, ist der von uns gewählte Versuchsaufbau von allen Probanden über

die Untersuchung eingehalten worden. Die ermittelten Daten sind daher sehr gut vergleichbar, da unter gleichen Bedingungen generiert.

5.3.3 Untersuchungsablauf

Alle gesungenen Übungen sind gesangstechnische Übungen, welche über das gesamte Gesangsstudium hinweg praktiziert werden, um gesangstechnische Fertigkeiten zu trainieren. Am Studio für Stimmforschung der Hochschule für Musik in Dresden werden diese Übungen bereits seit Jahrzehnten zur Analyse der Qualität der Gesangsstimme genutzt. Somit können die Übungen als etabliert angesehen werden und sind damit auch geeignet, die muskulären Koordinationsmuster während des Singens zu analysieren. Obwohl von allen Studenten schon einmal praktiziert, war ihnen vor der beschriebenen Eingangsuntersuchung nicht bekannt, welche Übungen von ihnen zu singen sein würden. Ein Einfluss aufgrund von „Training“ kann weitgehend ausgeschlossen werden.

Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen (Pettersen 2005, Pettersen 2006) wurden nur diese einheitlichen Übungen analysiert, welche im Vergleich zu frei wählbaren Arien eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich Atemmuster und muskulärer Beanspruchung gewährleisteten. Auch Thomasson erkannte dieses Problem bezüglich der Vergleichbarkeit frei gewählter Arien bei seinen Untersuchungen der Atemmuster von professionellen Sängern (Thomasson und Sundberg 1999).

5.3.4 Elektrodenpositionierung

Die Markierungen für die Positionierung der Elektroden wurden immer vom gleichen erfahrenen Untersucher nach internationalen Richtlinien angebracht (Hermens et al. 1999). Somit konnten Messfehler aufgrund inadäquater Elektrodenpositionierung (Hermens und Vollenbroek-Hutten 2004) als Störgrößen bei der Messung mittels OEMG minimiert werden. Ihre Auswahl zeigte sich bei der Auswertung der Ergebnisse als geeignet, um die muskuläre Koordination im Bereich des Rumpfes zu beurteilen.

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist jedoch anzumerken, dass die Hinzunahme eines Elektrodenpaares im Bereich der oberen Interkostalmuskulatur zu erwägen wäre, um

eine deutlichere Trennung des Aktivitätsverhaltens zwischen oberer und unterer Interkostalmuskulatur zu erreichen. Wegen der anatomischen Gegebenheiten bei weiblichen Probanden wurde bei unserer Untersuchung von solch einem Elektrodenpaar jedoch abgesehen, da die starke anatomische Varianz bei weiblichen Probanden eine nicht zu beurteilende Störgröße für die Aktivitätsmessung mittels OEMG impliziert.

Bedenken bezüglich der Aussagekraft der Ergebnisse von tiefer liegenden Muskeln wie QL können durch vergleichende Untersuchungen zwischen Nadel-EMG und Oberflächen-EMG entkräftet werden, bei denen letztlich identische Aussagen erzielt wurden (McGill et al. 1996).

5.4 Überlegungen zur Messwerterfassung und Auswertung

5.4.1 Ermittlung der Referenzwerte

Für die Ermittlung von Referenzwerten bei der Elektromyographie stehen prinzipiell zwei verschiedene Verfahren zur Verfügung. Eine gebräuchliche Variante ist die Normierung auf die MVC (maximum voluntary contraction) (Kendall et al. 2008). Aufgrund der Fülle der untersuchten Muskeln und deren schlecht durchführbare isolierte Kontraktion ist dieses Verfahren für den beschriebenen Untersuchungsaufbau jedoch nicht geeignet. Als praktikableres Verfahren zur Generierung von Referenzmaximalwerten wurde bei dieser Untersuchung die Erfassung von Bezugswerten mittels einer übungsspezifischen Situation mit maximaler Beanspruchung aller zu untersuchenden Muskeln gewählt. Auch Yang (Yang und Winter 1984) und Mathiassen (Mathiassen et al. 1995) sehen ein solches Verfahren als Mittel der Wahl bei komplexen Untersuchungen mit mehreren Muskeln an.

In die Ermittlung der Referenzmaximalwerte wurden die forcierte Ex- und die forcierte Inspiration einbezogen. Aufgrund der im Vorfeld gewählten Auswertestrategie ist im Nachgang nicht mehr ersichtlich, in welcher der Situationen der jeweilige Maximalwert generiert wurde. Dies vermied einerseits im Verlauf der Untersuchungen eine voreingenommene Betrachtungsweise der ermittelten Ergebnisse, brachte andererseits aber bei den Auswertungen der statistischen Ergebnisse auch Schwierigkeiten mit sich. So ist bei ermittelten Unterschieden zwischen Männern und Frauen bezüglich ihrer relativen muskulären Aktivierung, also ihres Beanspruchungsniveaus einzelner

Muskeln, nicht möglich zu sagen, ob eine sichtbar höhere Beanspruchung eines Muskels während der Phonation, also der sängerischen Expiration, einem Referenzmaximalwert aus einer Referenz-Expiration oder einer Referenz-Inspiration gegenübersteht.

Trotz dieser methodischen Einwände zeigt sich bei der Analyse der Ergebnisse, dass für einige Muskeln während des Singens Werte deutlich über der maximalen Beanspruchung während der Referenzsituation gemessen wurden. Als wahrscheinlichste Ursache dafür ist anzunehmen, dass die betreffenden Muskeln während des Singens unbewusst doch in einer intensiveren Art beansprucht wurden, als es bei der forcierten Ein- und Ausatmung während der Referenzsituation erfolgte, da diese stärker beanspruchten Muskeln vor allem bei der sängerischen Einatmung (TD) und Phonation (SCM, TD) von Bedeutung sind, nicht aber bei der Ventilationsatmung. Wäre eine gesangsspezifische Situation, wie das Singen eines langen Tones, als Referenzsituation gewählt worden, hätte man die für die sängerische Atmung typischen und sich von der Ventilationsatmung unterscheidenden Muskelbeanspruchungen jedoch nicht aufdecken können.

So aber ist zu schlussfolgern, dass sich sängerische Atmung und Ventilationsatmung für diese Muskeln in Bezug auf die muskuläre Koordination unterscheiden. Bei der Beurteilung der betreffenden Muskeln fällt auf, dass es gerade die beiden Muskeln sind, für welche eine erhöhte Aktivität aufgrund einer unphysiologischen Aktivierung im Sinne einer angespannten Haltung während des Singens diskutiert wurde (5.1.2.8). Diese Überlegungen wurden auch in anderen Untersuchungen bestätigt, da die Möglichkeit gegeben ist, deren Aktivitätssenkung durch Biofeedback zu erreichen, worauf bei der Sängerausbildung größere Aufmerksamkeit zu richten wäre (Pettersen 2005).

5.4.2 Anzahl der Wiederholungen

In der Literatur zur Muskelaktivitätsmessung wird eine minimale Anzahl von 10 Wiederholungen empfohlen, (Perry und Burnfield 1992) über welche die rms (root mean square) gemittelt werden. Eine Mittelung der gemessenen Werte ist unerlässlich, um die Werte beurteilbar zu machen. Roh-rms sind stochastische und damit nicht reproduzierbare Daten, welche sich nicht vergleichen lassen (McGill 2004). Erst durch eine Mittelung über mehrere Wiederholungen wird es möglich, die gemessenen Aktivitätsverläufe zu vergleichen. Aus gesangspädagogischer Sicht sind 3

Wiederholungen sinnvoll, um eine optimale Gesangstechnik und Stimmqualität zu gewährleisten, da bei einer zu großen Anzahl an Wiederholungen die muskuläre Grundspannung, welche für den Stützvorgang nötig ist, nachlassen würde. Für die Gesangsübungen wurden jeweils fünf Wiederholungen durchgeführt. Die gewählte Anzahl an Wiederholungen stellt einen Kompromiss zwischen den Anforderungen der Messmethode und der Durchführbarkeit für die Gesangsstudenten dar. Damit liegen die von uns gewählten 5 Wiederholungen zwischen messtechnischen und gesangspädagogischen Anforderungen. Deshalb wurde für die beschriebene Untersuchung im Vorfeld eine Auswertungsstrategie festgelegt, welche die Mittelung der fünf Wiederholungen automatisch noch vor der statistischen Auswertung der Daten durchführt. Allerdings ist es im Nachgang nicht möglich gewesen, intraindividuelle Unterschiede der muskulären Koordination in den fünf Wiederholungen zu analysieren, was aber bei der Aufgabenstellung, allgemeingültige Aussagen für die Probandengruppe zu treffen, auch nicht zielführend gewesen wäre.

5.4.3 Unterteilung der Betrachtungszeiträume (dynamisch)

Für die Auswertestrategien, welche schon im Vorfeld der Untersuchungen entworfen wurden, ist es als sinnvoll erachtet worden, die 100 Messzeitpunkte für die statistische Auswertung in jeweils 10 äquidistante Zeitintervalle zu unterteilen. Bei der Analyse der statistischen Daten fiel auf, dass dadurch kurzzeitige Entwicklungen, welche bei der Betrachtung der Rohdaten noch sichtbar waren, in der statistischen Auswertung nicht mehr widerspiegelt werden konnten. Eine Verkürzung der Analyseintervalle, das heißt eine Erhöhung der Anzahl der Betrachtungszeiträume, würde kurzzeitigere Schwankungen zwar zum Teil widerspiegeln, würde aber vor allem die kritische Rangzahldifferenz vergrößern, sodass der Informationsgewinn durch Zwischengrößen das Erreichen von Signifikanzschwellen erschweren und damit die Aussagekraft einschränken würde. Mit einer Erhöhung der Probandenzahl könnte man dies verhindern, jedoch läuft man damit grundsätzlich Gefahr, dem Fehler 1. Ordnung zu unterliegen, das heißt, aufgrund des hohen Stichprobenumfanges fälschlicherweise eigentlich nicht signifikante Unterschiede als solche zu interpretieren. Realistischerweise ist aber hier festzustellen, dass diese Überlegung eher theoretischer Natur ist. Daher ist die Auswahl von 10 Betrachtungszeiträumen im Sinne der Reduktion sowohl eines Fehlers erster als auch zweiter Ordnung für die vorliegende Untersuchung

ausreichend. So wurde es möglich, sowohl signifikante Unterschiede im Verlauf der einzelnen Übungen nachzuweisen als auch kurzzeitige sich statistisch nicht widerspiegelnde Aktivitätsänderungen über die Beschreibung der Rohdaten zu charakterisieren.

5.5 Schlussfolgerung und Ausblick

Zusammenfassend kann man sagen, dass die vorliegende Arbeit einen umfassenden Überblick darüber gibt, wie Gesangsstudenten zum Beginn ihrer Ausbildung sowohl die Einatemphase vor einer Gesangspassage als auch die Phonationsatmung während des Singens muskulär koordinieren.

Im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen dieser Art ist eine umfangreiche Zahl an Muskeln in die Messung einbezogen worden, sodass sowohl für die Atemmuskulatur als auch für die Atem-, Bauch-, Thorax-, Hals-, Nacken und Rückenmuskulatur eine parallele Analyse ihrer Funktion beim Singen möglich war. Es wurde gezeigt, dass alle diese Muskeln für das kontrollierte Ein- und Ausatmen während des Singens von Bedeutung sind und dass es einige Muskeln (SCM, TD) gibt, welche während der Phonationsatmung deutlich mehr beansprucht werden, als dies bei der Ventilationsatmung der Fall ist. Ebenfalls besonders hervorzuheben ist die Beobachtung, dass die oft benutzte Metapher „aus dem unteren Rücken stützen“ ihr funktionelles Korrelat in den erhöhten muskulären Aktivitäten von QL und MF zu Beginn der Gesangsübungen findet.

Mit der Durchführung von vier verschiedenen etablierten Gesangsübungen und deren fünfmalige Wiederholung durch alle Gesangsstudenten ist, im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen, bei denen zum Teil frei wählbare Arien zu singen waren, eine hohe Standardisierung der Daten gegeben. Die Ergebnisse zeigen zwar teilweise weiterhin ausgeprägte interindividuelle Variabilität bezüglich der Höhe der erreichten absoluten und relativen Muskelaktivierungen, jedoch sind die Koordinationsmuster sowohl für die Einatmung als auch für die Phonation über die Übungen hinweg bei den untersuchten Gesangsstudenten aufgrund der nachgewiesenen geringen interindividuellen Varianz (5.2.4) vergleichbar ausgebildet.

Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Studenten schon in diesem frühen Ausbildungsstadium einheitliche muskuläre Koordinationsmuster für die Einatmung und die Phonation etabliert haben. Interessant ist der schon erwähnte Unterschied bezüglich

der Beanspruchung der Nackenmuskeln SCM und TD im Vergleich von Ventilations- und Phonationsatmung.

Für den weiteren Verlauf der Langzeituntersuchung ist es nun interessant zu beobachten, ob und inwieweit sich diese Muster im Verlauf des Gesangsstudiums verändern. Auch Thomasson wies in seinen Untersuchungen (Thomasson und Sundberg 1999) darauf hin, dass erst eine Langzeitbeobachtung wirklich Aufschluss darüber geben könnte, ob die evaluierten Parameter eine konsistente Ausprägung über die Zeit besitzen oder ob sie sich im Verlauf des sängerischen Lernens ändern und zu einer besseren Gesangsstimme beitragen.

Schon Pettersen konnte zeigen, dass es Unterschiede bezüglich der Höhe der Muskelaktivierungen zwischen Gesangstudenten und professionellen Opernsängern gibt. Bei ihm zeigte sich, dass die professionellen Sänger zum Teil deutlich höhere Muskelaktivitäten generieren konnten (Pettersen 2005). Diese Ergebnisse wurden allerdings bei frei wählbar zu singenden Arien erzielt, sind also in ihrer direkten Vergleichbarkeit zur vorliegenden Arbeit nur bedingt zu verwerten. Daher ist besonders der noch geplante Vergleich der Ergebnisse der standardisierten Gesangsübungen zwischen Studenten und professionellen Sängern interessant.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Abe T, Kearns CF, Fukunaga T. 2003. Sex differences in whole body skeletal muscle mass measured by magnetic resonance imaging and its distribution in young Japanese adults. *Br J Sports Med*, 37 (5):436-440.
- Abe T, Kusuhashi N, Yoshimura N, Tomita T, Easton PA. 1996. Differential respiratory activity of four abdominal muscles in humans. *J Appl Physiol*, 80 (4):1379-1389.
- Ainscough-Potts AM, Morrissey MC, Critchley D. 2006. The response of the transverse abdominis and internal oblique muscles to different postures. *Man Ther*, 11 (1):54-60.
- Akerlund L, Gramming P. 1994. Average loudness level, mean fundamental frequency, and subglottal pressure: comparison between female singers and nonsingers. *J Voice*, 8 (3):263-270.
- Andersen KF, Sonninen A. 1960. The Function of the Extrinsic Laryngeal Muscles at Different Pitch. *Acta Oto-laryngologica*, 51 (1-2):89-93.
- Basmajian JV, De Luca CJ. 1985. *Muscles Alive*. 5te Aufl. Baltimore, London, Sydney: Williams and Wilkins.
- Beck TW, Housh TJ, Cramer JT, Stout JR, Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Defreitas JM. 2009. Electrode placement over the innervation zone affects the low-, not the high-frequency portion of the EMG frequency spectrum. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19 (4):660-666.
- Benninghoff. 2003. *Anatomie - Band 1*. 16. Auflage. München - Jena: Urban & Fischer Verlag.
- Biesalski P, Frank F. 1994. *Phoniatrie - Pädaudiologie in 2 Bänden*. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag Stuttgart - New York.
- Binazzi B, Lanini B, Bianchi R, Romagnoli I, Nerini M, Gigliotti F, Duranti R, Milic-Emili J, Scano G. 2006. Breathing pattern and kinematics in normal subjects during speech, singing and loud whispering. *Acta Physiol (Oxf)*, 186 (3):233-246.
- Bouhuys A, Proctor DF, Mead J. 1966. Kinetic aspects of singing. *J Appl Physiol*, 21 (2):483-496.
- Boyd W, Blincoe H, Hayner JC. 1965. Sequence of Action of the Diaphragm and Quadratus Lumborum during Quiet Breathing. *Anat Rec*, 151:579-581.
- Bradl I, Morl F, Scholle HC, Grassme R, Müller R, Grieshaber R. 2005. Back muscle activation pattern and spectrum in defined load situations. *Pathophysiology*, 12 (4):275-280.
- Burden A, Bartlett R. 1999. Normalisation of EMG amplitude: an evaluation and comparison of old and new methods. *Med Eng Phys*, 21 (4):247-257.

- Cala SJ, Edyvean J, Engel LA. 1992. Chest wall and trunk muscle activity during inspiratory loading. *J Appl Physiol*, 73 (6):2373-2381.
- Campbell EJ. 1952. An electromyographic study of the role of the abdominal muscles in breathing. *J Physiol*, 117 (2):222-233.
- Campbell EJ. 1955. The role of the scalene and sternomastoid muscles in breathing in normal subjects; an electromyographic study. *J Anat*, 89 (3):378-386.
- Campbell EJM. 1968. The respiratory muscles. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 155 (1):135-140.
- Carpenter MG, Tokuno CD, Thorstensson A, Cresswell AG. 2008. Differential control of abdominal muscles during multi-directional support-surface translations in man. *Exp Brain Res*, 188 (3):445-455.
- Cerqueira EP, Garbellini D. 1999. Electromyographic study of the pectoralis major, serratus anterior and external oblique muscles during respiratory activity in humans. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 39 (3):131-137.
- Cholewicki J, Ivancic PC, Radebold A. 2002. Can increased intra-abdominal pressure in humans be decoupled from trunk muscle co-contraction during steady state isometric exertions? *Eur J Appl Physiol*, 87 (2):127-133.
- Collyer S, Kenny DT, Archer M. 2009a. The effect of abdominal kinematic directives on respiratory behaviour in female classical singing. *Logoped Phoniatr Vocol*, 34 (3):100-110.
- Collyer S, Kenny DT, Archer M. 2009b. Listener perception of the effect of abdominal kinematic directives on respiratory behavior in female classical singing. *J Voice*, 25 (1):e15-24.
- Collyer S, Thorpe CW, Callaghan J, Davis PJ. 2008. The influence of fundamental frequency and sound pressure level range on breathing patterns in female classical singing. *J Speech Lang Hear Res*, 51 (3):612-628.
- Costa D, Vitti M, de Oliveira Tosello D, Costa RP. 1994. Participation of the sternocleidomastoid muscle on deep inspiration in man. An electromyographic study. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 34 (5):315-320.
- Cresswell AG, Grundstrom H, Thorstensson A. 1992. Observations on intra-abdominal pressure and patterns of abdominal intra-muscular activity in man. *Acta Physiol Scand*, 144 (4):409-418.
- De Foa JL, Forrest W, Biedermann HJ. 1989. Muscle fibre direction of longissimus, iliocostalis and multifidus: landmark-derived reference lines. *J Anat*, 163:243-247.
- De Luca CJ. 1979. Physiology and Mathematics of Myoelectric Signals. *IEEE Trans Biomed Eng*, 26 (6):313-325.
- De Luca CJ. 1997. The use of surface electromyography in biomechanics. *J Appl Biomech*, 13 (2):135-163.
- De Luca CJ, Knaflitz M. 1992. *Surface Electromyography: What's New?* Aufl. Turin: C.L.U.T.

- De Luca G. 2001. Fundamental Concepts in EMG Signal Acquisition. Aufl. Delsys.
- De Troyer A, Estenne M. 1984. Coordination between rib cage muscles and diaphragm during quiet breathing in humans. *J Appl Physiol*, 57 (3):899-906.
- De Troyer A, Estenne M, Ninane V, Van Gansbeke D, Gorini M. 1990. Transversus abdominis muscle function in humans. *J Appl Physiol*, 68 (3):1010-1016.
- Drake JD, Callaghan JP. 2006. Elimination of electrocardiogram contamination from electromyogram signals: An evaluation of currently used removal techniques. *J Electromyogr Kinesiol*, 16 (2):175-187.
- Elliot N, Sundberg J, Gramming P. 1997. Physiological aspects of a vocal exercise. *J Voice*, 11 (2):171-177.
- Emmons S. 1988. Breathing for singing. *Journal of Voice*, 2 (1):30-35.
- Faaborg-Andersen K, Buchthal F. 1956. Action potentials from internal laryngeal muscles during phonation. *Nature*, 177 (4503):340-341.
- Faaborg-Andersen K, Vennard W. 1964. Electromyography of Extrinsic Laryngeal Muscles during Phonation of Different Vowels. *Ann Otol Rhinol Laryngol*, 73:248-254.
- Falla D, Dall'Alba P, Rainoldi A, Merletti R, Jull G. 2002. Location of innervation zones of sternocleidomastoid and scalene muscles--a basis for clinical and research electromyography applications. *Clin Neurophysiol*, 113 (1):57-63.
- Farina D, Cescon C, Merletti R. 2002. Influence of anatomical, physical, and detection-system parameters on surface EMG. *Biol Cybern*, 86 (6):445-456.
- Farina D, Merletti R, Indino B, Graven-Nielsen T. 2004a. Surface EMG crosstalk evaluated from experimental recordings and simulated signals. Reflections on crosstalk interpretation, quantification and reduction. *Methods Inf Med*, 43 (1):30-35.
- Farina D, Mesin L, Martina S, Merletti R. 2004b. Comparison of spatial filter selectivity in surface myoelectric signal detection: influence of the volume conductor model. *Med Biol Eng Comput*, 42 (1):114-120.
- Fischer E. 1969. Handbuch der Stimmbildung. Aufl. Tutzing: Hans Schneider.
- Floyd WF, Silver PH. 1950. Electromyographic study of patterns of activity of the anterior abdominal wall muscles in man. *J Anat*, 84 (2):132-145.
- Forchhammer J. 1937. Stimmbildung auf stimm- und sprachphysiologischer Grundlage. Aufl. München: Verlag von J.F. Bergmann.
- Friedrich G, Bigenzahn W, Zorowka P. 2008. Phoniatrie und Pädaudiologie - Einführung in die medizinischen, psychologischen und linguistischen Grundlage von Stimme, Sprache und Gehör. 4. Auflage Aufl. Bern: Verlag Hans Huber.
- Gans C, Gorniak GC. 1980. Electromyograms are repeatable: precautions and limitations. *Science*, 210 (4471):795-797.

- Goldman JM, Lehr RP, Millar AB, Silver JR. 1987. An electromyographic study of the abdominal muscles during postural and respiratory manoeuvres. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 50 (7):866-869.
- Göpfert B. 2002. Handbuch der Gesangskunst. 4. Auflage Aufl. Wilhelmshafen: Florian Noetzel Verlag.
- Griffin B, Woo P, Colton R, Casper J, Brewer D. 1995. Physiological characteristics of the supported singing voice. A preliminary study. *J Voice*, 9 (1):45-56.
- Hermens HJ, Vollenbroek-Hutten MM. 2004. Effects of electrode dislocation on electromyographic activity and relative rest time: effectiveness of compensation by a normalisation procedure. *Med Biol Eng Comput*, 42 (4):502-508.
- Hermens HJ, Freriks B, Merletti R, Stegeman DF, Blok J, Rau G, Disselhorst-Klug C, Hägg G. 1999. European Recommendations for Surface ElectroMyoGraphy, results of the SENIAM project. Aufl. Enschede: Roessingh Research and Development b.v.
- Hirano M. 1988. Vocal mechanisms in singing: Laryngological and phoniatic aspects. *Journal of Voice*, 2 (1):51-69.
- Hirano M, Koike Y, von Leden H. 1967. The sternohyoid muscle during phonation. Electromyographic studies. *Acta Otolaryngol*, 64 (5):500-507.
- Hirano M, Ohala J, Vennard W. 1969. The function of laryngeal muscles in regulating fundamental frequency and intensity of phonation. *J Speech Hear Res*, 12 (3):616-628.
- Hirano M, Vennard W, Ohala J. 1970. Regulation of register, pitch and intensity of voice. An electromyographic investigation of intrinsic laryngeal muscles. *Folia Phoniatr (Basel)*, 22 (1):1-20.
- Hodges P, Gandevia SC. 2000. Changes in intra-abdominal pressure during postural and respiratory activation of the human diaphragm. *J Appl Physiol*, 89:967-976.
- Hoit JD, Plassman BL, Lansing RW, Hixon TJ. 1988. Abdominal muscle activity during speech production. *J Appl Physiol*, 65 (6):2656-2664.
- Hoit JD, Jenks CL, Watson PJ, Cleveland TF. 1996. Respiratory function during speaking and singing in professional country singers. *J Voice*, 10 (1):39-49.
- Husler F, Rodd-Marling Y. 1978. Singen - Die physische Natur des Stimmorgans - Anleitung zum Aufschließen der Singstimme. 2. Auflage Aufl. Mainz: Schott.
- Iwarsson J. 2001. Effects of inhalatory abdominal wall movement on vertical laryngeal position during phonation. *J Voice*, 15 (3):384-394.
- Iwarsson J, Sundberg J. 1998. Effects of lung volume on vertical larynx position during phonation. *J Voice*, 12 (2):159-165.
- Iwarsson J, Thomasson M, Sundberg J. 1998. Effects of lung volume on the glottal voice source. *J Voice*, 12 (4):424-433.

- Jensen C, Vasseljen O, Westgaard RH. 1993. The influence of electrode position on bipolar surface electromyogram recordings of the upper trapezius muscle. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 67 (3):266-273.
- Kasper H-J. 2008. Singen und Flugzeuge. Stimmhygiene und Stimmregeneration mit dem Bernoulli-Effekt. Aufl. Burr, Otzenhausen.
- Kendall F, Kendall E, Provance P. 2008. Muskeln. Funktionen und Tests. 4. Auflage te Aufl. Urban & Fischer.
- Klingholz F. 2000. Medizinischer Leifaden für Sänger. Aufl. Libri Books on Demand.
- Leanderson R, Sundberg J. 1988. Breathing for singing. *Journal of Voice*, 2 (1):2-12.
- Leanderson R, Sundberg J, von Euler C. 1987. Role of diaphragmatic activity during singing: a study of transdiaphragmatic pressures. *J Appl Physiol*, 62 (1):259-270.
- Lohse H, Ludwig R, Röhr M. 1982. Statistische Verfahren für Psychologen, Pädagogen und Soziologen. Aufl. Berlin: Volk und Wissen.
- Lowery MM, Stoykov NS, Tafllove A, Kuiken TA. 2002. A multiple-layer finite-element model of the surface EMG signal. *IEEE Trans Biomed Eng*, 49 (5):446-454.
- Luttmann A, Jäger M, Sökeland J, Laurig W. 1996. Electromyographical study on surgeons in urology. II Determination of muscular fatigue. *Ergonomics*, 39 (2):298-313.
- Marras WS, Davis KG. 2001. A non-MVC EMG normalization technique for the trunk musculature: Part 1. Method development. *J Electromyogr Kinesiol*, 11 (1):1-9.
- Marshall P, Murphy B. 2003. The validity and reliability of surface EMG to assess the neuromuscular response of the abdominal muscles to rapid limb movement. *J Electromyogr Kinesiol*, 13 (5):477-489.
- Martienssen-Lohmann F. 1956. Der wissende Sänger - Gesangslexikon in Skizzen. Aufl. Zürich: Atlantis Verlag.
- Mathelitsch L, Friedrich G. 1995. Die Stimme - Instrument für Sprache und Gesang. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag
- Mathiassen SE, Winkel J, Hagg GM. 1995. Normalization of surface EMG amplitude from the upper trapezius muscle in ergonomic studies -- A review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 5 (4):197-226.
- McCoy S. 2005. Breath management: gender-based differences in classical singers. *Folia Phoniatr Logop*, 57 (5-6):246-254.
- McGill KC. 2004. Surface electromyogram signal modelling. *Med Biol Eng Comput*, 42 (4):446-454.
- McGill S, Juker D, Kropf P. 1996. Appropriately placed surface EMG electrodes reflect deep muscle activity (psoas, quadratus lumborum, abdominal wall) in the lumbar spine. *J Biomech*, 29 (11):1503-1507.

- Mead J, Bouhuys A, Proctor DF. 1968. Mechanisms generating subglottic pressure. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 155 (1):177-182.
- Mendes AP, Brown WS, Sapienza C, Rothman HB. 2006. Effects of vocal training on respiratory kinematics during singing tasks. *Folia Phoniatr Logop*, 58 (5):363-377.
- Merletti R, Rainoldi A, Farina D. 2001. Surface electromyography for noninvasive characterization of muscle. *Exerc Sport Sci Rev*, 29 (1):20-25.
- Mörl F, Anders C, Graßme R. 2010. An easy and robust method for ECG artifact elimination of SEMG signals Aalborg: Omnipress.
- Newsom J, Sears T. 1970. The proprioceptive reflex control of the intercostals muscles during their voluntary activation. *Journal of Physiology*, 209:711-738.
- Ng JK, Kippers V, Richardson CA. 1998. Muscle fibre orientation of abdominal muscles and suggested surface EMG electrode positions. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 38 (1):51-58.
- Perry J, Burnfield J. 1992. *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*. 2te Aufl. Thorofare: Slack Inc.
- Pettersen V. 2005. Muscular patterns and activation levels of auxiliary breathing muscles and thorax movement in classical singing. *Folia Phoniatr Logop*, 57 (5-6):255-277.
- Pettersen V. 2006. Preliminary findings on the classical singer's use of the pectoralis major muscle. *Folia Phoniatr Logop*, 58 (6):427-439.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2002. Muscle activity in the classical singer's shoulder and neck region. *Logoped Phoniatr Vocol*, 27 (4):169-178.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2004a. Muscle activity in professional classical singing: a study on muscles in the shoulder, neck and trunk. *Logoped Phoniatr Vocol*, 29 (2):56-65.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2004b. The association between upper trapezius activity and thorax movement in classical singing. *J Voice*, 18 (4):500-512.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2005. The activity patterns of neck muscles in professional classical singing. *J Voice*, 19 (2):238-251.
- Pettersen V, Eggebo TM. 2009. The movement of the diaphragm monitored by ultrasound imaging: preliminary findings of diaphragm movements in classical singing. *Logoped Phoniatr Vocol*, 35 (3):105-112.
- Pettersen V, Bjorkoy K, Torp H, Westgaard RH. 2005. Neck and shoulder muscle activity and thorax movement in singing and speaking tasks with variation in vocal loudness and pitch. *J Voice*, 19 (4):623-634.
- Phillips S, Mercer S, Bogduk N. 2008. Anatomy and biomechanics of quadratus lumborum. *Proc Inst Mech Eng H*, 222 (2):151-159.

- Raper AJ, Thompson WT, Jr., Shapiro W, Patterson JL, Jr. 1966. Scalene and sternomastoid muscle function. *J Appl Physiol*, 21 (2):497-502.
- Redenbaugh MA, Reich AR. 1989. Surface EMG and related measures in normal and vocally hyperfunctional speakers. *J Speech Hear Disord*, 54 (1):68-73.
- Reid DC, Bowden J, Lynne-Davies P. 1976. Role of selected muscles of respiration as influenced by posture and tidal volume. *Chest*, 70 (5):636-640.
- Riesch A. 1972. *Lebendige Stimme - Stimmbildung für Sprache und Gesang*. Aufl. Schott.
- Rubin JS, Korovin GS, Epstein R. 2003. *Special Considerations for the Professional Voice*. Aufl. Deleamar Learning.
- Sand S, Sundberg J. 2005. Reliability of the term 'support' in singing. *Logoped Phoniatr Vocol*, 30 (2):51-54.
- Sataloff RT. 1988. Respiration and singing. *Journal of Voice*, 2 (1):1-1.
- Schlaffhorst C, Andersen H. 1928. *Atmung und Stimme*. Aufl. Wolfenbüttel: Mösseler Verlag.
- Schmidt R, Thews G, Lang F. 2000. *Physiologie des Menschen*. 27. Aufl. Auflage Aufl. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag.
- Sears T. 1977. *Some neural and mechanical aspects of singing* Aufl. London: Heinemann Educational Books
- Seidner W, Wendler J. 1978. *Die Sängerstimme*. Aufl. Berlin: Henschelverlag Kunst und Gesellschaft DDR.
- Shiavi R, Bugle HJ, Limbird T. 1987. Electromyographic gait assessment, Part 1: Adult EMG profiles and walking speed. *J Rehabil Res Dev*, 24 (2):13-23.
- Shipp T. 1975. Vertical laryngeal position during continuous and discrete vocal frequency change. *J Speech Hear Res*, 18 (4):707-718.
- Shipp T, Izdebski K. 1975. Letter: Vocal frequency and vertical larynx positioning by singers and nonsingers. *J Acoust Soc Am*, 58 (5):1104-1106.
- Shirley D, Hodges PW, Eriksson AE, Gandevia SC. 2003. Spinal stiffness changes throughout the respiratory cycle. *J Appl Physiol*, 95 (4):1467-1475.
- Sjolander P, Sundberg J. 2004. Spectrum effects of subglottal pressure variation in professional baritone singers. *J Acoust Soc Am*, 115 (3):1270-1273.
- Sonninen A, Laukkanen AM, Karma K, Hurme P. 2005. Evaluation of support in singing. *J Voice*, 19 (2):223-237.
- Sundberg J. 1997. *Die Wissenschaft von der Singstimme*. Aufl. Bonn: Orpheus Verlag GmbH.

- Sundberg J, Leanderson R, von Euler C. 1989. Activity relationship between diaphragm and cricothyroid muscles. *Journal of Voice*, 3 (3):225-232.
- Sundberg J, Andersson M, Hultqvist C. 1999. Effects of subglottal pressure variation on professional baritone singers' voice sources. *J Acoust Soc Am*, 105 (3):1965-1971.
- Sundberg J, Leanderson R, von Euler C, Knutsson E. 1991. Influence of body posture and lung volume on subglottal pressure control during singing. *Journal of Voice*, 5 (4):283-291.
- Sundberg J, Birch P, Gumoos B, Stavard H, Prytz S, Karle A. 2007. Experimental findings on the nasal tract resonator in singing. *J Voice*, 21 (2):127-137.
- Takehara I, Chu J, Li TC, Schwartz I. 2004. Reliability of quantitative motor unit action potential parameters. *Muscle Nerve*, 30 (1):111-113.
- Taylor A. 1960. The contribution of the intercostal muscles to the effort of respiration in man. *J Physiol*, 151:390-402.
- Tesh KM, Dunn JS, Evans JH. 1987. The abdominal muscles and vertebral stability. *Spine*, 12 (5):501-508.
- Thomasson M, Sundberg J. 1999. Consistency of phonatory breathing patterns in professional operatic singers. *J Voice*, 13 (4):529-541.
- Thomasson M, Sundberg J. 2001. Consistency of Inhalatory Breathing Patterns in Professional Operatic Singers. *Journal of Voice*, 15 (3):373-383.
- Thorpe CW, Cala SJ, Chapman J, Davis PJ. 2001. Patterns of breath support in projection of the singing voice. *J Voice*, 15 (1):86-104.
- Titze IR. 1989. On the relation between subglottal pressure and fundamental frequency in phonation. *J Acoust Soc Am*, 85 (2):901-906.
- Tomich GM, Franca DC, Diorio AC, Britto RR, Sampaio RF, Parreira VF. 2007. Breathing pattern, thoracoabdominal motion and muscular activity during three breathing exercises. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 40:1409-1417.
- Valerius K-P, Frank A, Kolster BC, Hirsch MC, Hamilton C, Lafont EA. 2002. *Das Muskelbuch - Funktionelle Darstellung der Muskeln des Bewegungsapparates*. Aufl. Stuttgart: Hippokrates Verlag.
- Vitti M, Fujiwara M, Basmanjian JM, Iida M. 1973. The integrated roles of longus colli and sternocleidomastoid muscles: an electromyographic study. *Anat Rec*, 177 (4):471-484.
- Ward SR, Kim CW, Eng CM, Gottschalk LJt, Tomiya A, Garfin SR, Lieber RL. 2009. Architectural analysis and intraoperative measurements demonstrate the unique design of the multifidus muscle for lumbar spine stability. *J Bone Joint Surg Am*, 91 (1):176-185.
- Watson AH, Williams C, James BV. 2011. Activity Patterns in Latissimus Dorsi and Sternocleidomastoid in Classical Singers. *J Voice*,

- Watson PJ, Hoit JD, Lansing RW, Hixon TJ. 1989. Abdominal muscle activity during classical singing. *Journal of Voice*, 3 (1):24-31.
- Watson PJ, Hixon TJ, Stathopoulos ET, Sullivan DR. 1990. Respiratory kinematics in female classical singers. *Journal of Voice*, 4 (2):120-128.
- Wendler J, Seidner W, Kittel G, Eysholdt U. 1996. *Lehrbuch der Phoniatrie und Pädaudiologie*. 3. Auflage. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag Stuttgart - New York.
- White JRC. 1988. On the teaching of breathing for the singing voice. *Journal of Voice*, 2 (1):26-29.
- Winckel F. 1952. Elektroakustische Untersuchungen an der menschlichen Stimme. *Folia Phoniatri (Basel)*, Vol. 4, No. 2, 1952:93-113.
- Yang JF, Winter DA. 1984. Electromyographic amplitude normalization methods: improving their sensitivity as diagnostic tools in gait analysis. *Arch Phys Med Rehabil*, 65 (9):517-521.
- Yoshie M, Kudo K, Murakoshi T, Ohtsuki T. 2009. Music performance anxiety in skilled pianists: effects of social-evaluative performance situation on subjective, autonomic, and electromyographic reactions. *Exp Brain Res*, 199 (2):117-126.

7 Anhang

Tabelle 32 Übungslängen

Dargestellt sind für jeden einzelnen Probanden die durchschnittliche Übungslänge der einzelnen Übungen über die fünf Wiederholungen sowie Median und Mittelwert dieser Übungslängen über alle Probanden

Rot dargestellt jeweils die längste Übung

Blau dargestellt jeweils die kürzeste Übung

Probanden	Vokalausgleich	Dreiklang	Tonleiter	Schwellton
P01	6,7	8,1	7,3	9,3
P03	6,6	8	7,4	7,8
P04	6,3	9,3	8,1	8,6
P05	5,7	8,9	7,7	9,5
P06	7,2	10,6	8,1	10,5
P07	6,8	10,7	8,2	11,2
P08	6,5	9,1	9,5	12,3
P09	4,8	6,9	7,4	8,2
P18	6,7	9,3	7,4	9,3
P19	5,5	8,1	8	8,2
P20	6	7,8	7,1	7,2
P21	5,8	10,1	6,7	11,1
P22	7	8,5	7,5	12,4
P23	7,2	7,8	7	7,9
P24	6,8	9,7	7,8	9,9
P25	7,6	9,7	7,7	9,4
P26	7,1	10,5	9	11,6
P27	8,2	12,3	7,9	13,1
P28	6,6	9,9	6,6	8,5
P29	8,7	10	7,3	8
P30	8,4	9,6	7	12,2
P31	7,2	10	7,7	12,4
P32	6,6	8,1	7	9,6
Median	6,7	9,3	7,5	9,5
Mittelwert	6,8	9,3	7,6	9,9

Tabelle 33 Vergleich mittlere Rangzahlen der Endbereiche

Vergleich der mittleren Rangzahlen der relativen Muskelaktivitäten für alle Muskeln getrennt nach Anfangs- und Endbereiche im Vergleich der einzelnen Übungen

Rot ist jeweils die höchste Rangzahl also das höchste Beanspruchungsniveau in den Randbereichen der Übungen markiert

Blau ist jeweils die niedrigste Rangzahl also das niedrigste Beanspruchungsniveau in den Randbereichen der Übung markiert

(Für die Tonleiter Übung existiert kein betrachteter Anfangsbereich (siehe 3.4.1))

	Muskeln	Anfang			Kritische Rangzahl differenz	Ende				Kritische Rangzahl differenz
		Vokalausgleich	Dreiklang	Schwellton		Vokalausgleich	Dreiklang	Tonleiter	Schwellton	
links	DP	1,83	2,65	1,52	0,69	1,70	3,74	1,61	2,96	0,98
	ICO5	1,74	2,52	1,74	0,69	1,78	3,57	1,57	3,09	0,98
	ICO8	1,91	2,65	1,43	0,69	1,83	3,65	1,57	2,96	0,98
	OI	2,00	2,65	1,35	0,69	1,65	3,65	1,57	3,13	0,98
	OE	2,13	2,65	1,22	0,69	1,70	3,70	1,61	3,00	0,98
	RA	2,09	2,52	1,39	0,69	1,70	3,39	1,65	3,26	0,98
	SCM	1,61	2,48	1,91	0,69	2,26	2,61	3,22	1,91	0,98
	TD	1,74	1,96	2,30	0,69	1,78	2,83	2,30	3,09	0,98
	PM	1,74	2,26	2,00	0,69	1,83	3,57	1,78	2,83	0,98
	SA	1,61	2,52	1,87	0,69	1,96	3,65	1,48	2,91	0,98
	MF	1,87	2,43	1,70	0,69	1,91	3,48	1,91	2,70	0,98
	QL	2,04	2,35	1,61	0,69	1,91	3,78	1,65	2,65	0,98
	EI	1,78	2,74	1,48	0,69	1,96	3,70	1,70	2,65	0,98
	EL	1,74	2,43	1,83	0,69	1,91	3,57	1,48	3,04	0,98
	LD	1,65	2,57	1,78	0,69	1,78	3,61	1,52	3,09	0,98
rechts	DP	2,00	2,61	1,39	0,69	1,61	3,65	1,65	3,09	0,98
	ICO5	1,96	2,35	1,70	0,69	1,83	3,52	1,70	2,96	0,98
	ICO8	1,87	2,57	1,57	0,69	1,70	3,70	1,70	2,91	0,98
	OI	2,13	2,61	1,26	0,69	1,65	3,78	1,65	2,91	0,98
	OE	2,00	2,65	1,35	0,69	1,65	3,61	1,74	3,00	0,98
	RA	2,17	2,48	1,35	0,69	1,74	3,57	1,57	3,13	0,98
	SCM	2,09	2,35	1,57	0,69	2,39	2,70	3,09	1,83	0,98
	TD	1,61	1,96	2,43	0,69	1,57	2,65	2,48	3,30	0,98
	PM	1,70	2,22	2,09	0,69	1,65	3,52	1,78	3,04	0,98
	SA	1,74	2,61	1,65	0,69	1,74	3,78	1,65	2,83	0,98
	QL	2,09	2,26	1,65	0,69	1,96	3,35	2,09	2,61	0,98
	MF	2,13	2,22	1,65	0,69	1,74	3,65	1,78	2,83	0,98
	EI	2,17	2,61	1,22	0,69	1,87	3,70	1,70	2,74	0,98
	EL	1,61	2,30	2,09	0,69	1,87	3,52	1,70	2,91	0,98
	LD	1,87	2,26	1,87	0,69	1,65	3,65	1,78	2,91	0,98

Tabelle 34 Reliabilitätsanalysen

Dargestellt ist für die Muskulatur und die Bänder die Güte der Reliabilität für die verschiedenen Bezugsgrößen

 Intra - Class - Koeffizient > 0,9 = sehr gute Reliabilität

 Intra - Class - Koeffizient > 0,7 = gute Reliabilität

 Intra - Class - Koeffizient < 0,7 = schlechte Reliabilität

		Muskulatur																												Bänder					
		Links															rechts																		
		Atem-muskulatur			Bauch-muskulatur			Hals-Nacken-Muskulatur		Thorax-Muskulatur		Tiefe Rücken-Muskulatur		Oberflächl. Rücken-Muskulatur			Atem-muskulatur			Bauch-muskulatur			Hals-Nacken-Muskulatur		Thorax-Muskulatur		Tiefe Rücken-Muskulatur		Oberflächl. Rücken-Muskulatur						
		DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD	Band 1	Band 2	Band 3	
absolut	10%	+	+	+	+	+	++	+	++	++	++	++	++	-	+	+	+	+	+	+	++	++	++	++	++	++	+	++	+	-	+	+	++	+	++
	20%	+	++	+	+	+	++	+	++	++	++	+	++	+	++	+	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	++	+	++	+	++	+	++	
	30%	+	++	+	+	++	++	+	++	++	++	+	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	++	+	++	++	++	+	++	
	40%	+	++	+	++	++	++	+	++	++	++	+	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	++	+	++	++	++	-	+	
	50%	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	++	+	++	++	++	-	+	
	60%	++	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	+
	70%	++	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	+
	80%	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++
	90%	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	+	+	++	+	-	++	+	++	+	++	++	++	++	++	+	+	++	++	++	+	++
	100%	+	++	+	++	+	++	+	++	++	++	++	++	+	+	+	+	+	-	++	+	++	+	++	++	++	+	++	+	+	+	++	++	+	++
relativ max	10%	+	+		+	+		+	-	+	-	++	++	+	+	+	+	+		++	+	++	+	+	++	+		+	+	+	+	+			
	20%	++	++	+	+	++	++	+	-	+	+	++	++	+	+	+	+	+		++	+	++	++	-	++	+		+	+	+	+	+	+		
	30%	+	++	+	+	++	++	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	++	++	+	++	+		+	+	+	+	+	+	+		
	40%	+	++	-	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	++	++	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+		
	50%	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+		+	+	++	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	60%	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+		
	70%	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+		+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	+		
	80%	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	-	++	+	+	+	+	+	+	+	
	90%	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+		+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	
	100%	++	++	++	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	++	+	++	++	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
intermuskulär	10%	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	+	+	++	++	++	++		
	20%	++	++	+	++	++	++	+	++	++	++	+	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	++	++	++	++	
	30%	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	+	+	++	++	++	++	++	
	40%	++	++	+	++	++	++	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	+	++	++	++	++	
	50%	++	++	++	++	++	++	+	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	+	++	++	++	++	++	
	60%	++	++	++	++	++	++	+	+	++	+	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+	++	++	++	++	++	
	70%	++	++	++	++	++	++	+	++	++	+	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	+	++	++	++	++	++	
	80%	++	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	+	++	++	++	++	++	
	90%	++	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	++	+	++	+	++	++	++	++	++	
	100%	++	++	++	++	++	++	+	+	++	+	++	++	+	++	++	++	++	+	++	++	++	++	++	+	++	++	++	+	++	++	++	++	++	++

Tabelle 35 bis Tabelle 50 zeigen jeweils die mittleren Rangzahlen nach Friedman auf Grundlage der Mediane der Absolutwerte, jeweils der einzelnen Muskeln über die zehn Betrachtungsbereiche

Tabelle 35 Vokalausgleich Einatmen links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	5,91	9,04	6,65	3,00	2,22	5,00	3,22	5,00	4,22	2,87	4,13	6,22	5,17	4,48	4,87
20%	4,96	7,65	4,48	3,00	2,61	3,48	3,39	4,17	3,30	2,96	3,96	5,87	4,78	3,52	3,87
30%	3,30	6,52	3,35	3,00	3,48	2,57	3,48	2,65	2,78	3,52	3,00	5,30	2,83	2,74	3,09
40%	2,52	4,87	2,78	4,04	4,00	2,96	3,74	3,48	3,22	4,04	4,30	5,57	2,70	2,78	2,96
50%	3,91	4,43	3,65	4,52	4,87	4,30	4,48	4,17	5,43	4,43	5,52	5,61	4,09	4,13	4,17
60%	5,39	3,74	5,09	6,13	6,48	5,48	5,83	5,91	6,09	6,52	6,78	5,13	5,26	5,83	5,48
70%	6,87	3,70	6,39	7,22	7,65	7,39	6,70	7,04	8,00	7,43	8,00	4,35	7,57	7,83	7,30
80%	8,26	4,17	7,57	8,83	8,70	8,83	8,09	8,17	8,13	8,52	7,91	5,83	8,57	8,96	8,91
90%	7,96	4,70	8,00	8,52	8,13	8,35	8,70	7,78	7,96	7,70	6,83	6,04	8,04	8,61	8,61
100%	5,91	6,17	7,04	6,74	6,87	6,65	7,39	6,61	5,87	7,00	4,57	5,09	6,00	6,13	5,74

Tabelle 36 Vokalausgleich Einatmen rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	5,17	8,57	6,70	3,00	2,17	4,61	3,30	3,91	3,61	3,48	3,48	6,52	5,35	5,26	5,70
20%	4,09	7,39	4,91	2,48	2,48	3,61	3,39	3,70	2,70	3,22	3,52	6,26	4,30	4,00	4,39
30%	3,09	5,83	4,04	2,70	3,30	2,96	3,61	3,00	3,04	3,74	3,00	6,39	3,52	3,35	3,65
40%	3,35	5,09	2,83	3,17	3,26	2,61	4,52	3,96	3,61	3,96	4,00	6,13	3,43	2,70	3,48
50%	4,04	3,96	3,65	4,96	5,04	4,04	4,87	5,30	4,78	5,17	5,78	6,17	4,13	4,00	3,96
60%	5,43	4,30	4,35	6,17	6,61	5,83	6,00	5,65	6,43	6,09	6,96	4,83	5,39	5,65	5,35
70%	7,13	4,00	6,48	8,00	7,61	7,52	7,00	7,04	7,87	7,00	8,22	3,30	6,96	7,17	7,00
80%	8,52	4,22	7,96	8,70	8,52	8,78	7,74	8,26	8,30	7,26	8,26	4,48	8,22	9,00	8,17
90%	7,96	5,22	7,39	8,70	8,22	8,35	7,74	7,70	8,22	7,39	6,78	5,39	7,70	8,39	7,78
100%	6,22	6,43	6,70	7,13	7,78	6,70	6,83	6,48	6,43	7,70	5,00	5,52	6,00	5,48	5,52

Tabelle 37 Vokalausgleich Übung links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	2,05	1,77	2,00	5,00	6,55	2,36	5,27	2,91	3,64	7,27	4,77	3,64	2,86	2,77	2,95
20%	2,59	2,18	2,05	4,68	5,77	2,55	3,77	3,00	2,82	5,91	4,14	3,41	2,95	2,73	2,64
30%	2,86	3,00	3,05	3,86	4,50	2,82	3,09	2,91	3,82	4,59	2,82	3,68	3,18	2,95	2,91
40%	3,95	3,86	3,91	3,45	4,18	3,68	3,82	4,27	3,23	3,59	3,50	4,95	3,45	3,86	3,59
50%	5,00	4,95	5,09	4,36	4,32	4,68	4,05	5,14	4,95	3,45	4,41	5,23	4,50	4,86	4,68
60%	5,82	5,91	5,86	5,27	4,82	5,95	4,64	5,55	5,00	5,59	5,09	6,05	5,50	5,50	5,91
70%	7,36	7,41	7,18	6,68	6,14	7,09	6,45	6,86	7,05	7,45	6,36	6,23	7,09	7,14	7,36
80%	7,95	8,59	8,68	7,41	6,59	8,36	7,73	7,77	7,27	5,82	7,55	7,41	8,09	8,09	8,36
90%	9,32	9,77	9,68	8,14	6,64	9,50	8,59	9,09	9,50	5,50	8,59	8,05	9,68	9,45	9,18
100%	8,09	7,55	7,50	6,14	5,50	8,00	7,59	7,50	7,73	5,82	7,77	6,36	7,68	7,64	7,41

Tabelle 38 Vokalausgleich Übung rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	2,45	1,68	2,23	4,59	6,41	3,00	3,91	3,55	3,18	6,55	4,95	3,09	2,90	2,77	2,27
20%	3,05	2,05	2,91	4,27	5,64	3,27	3,91	3,09	3,14	6,23	4,23	3,14	2,57	2,68	2,64
30%	3,55	2,86	3,23	3,91	4,91	3,32	3,27	3,18	3,09	4,91	3,14	3,55	3,33	3,00	2,82
40%	3,86	3,73	3,59	4,18	4,86	3,82	4,36	4,18	3,41	4,27	3,41	4,55	3,90	4,05	3,50
50%	5,05	4,95	4,73	4,91	4,73	4,36	4,77	4,86	4,55	3,59	3,86	5,45	4,86	4,77	4,73
60%	5,64	6,27	5,91	4,73	4,86	5,32	5,23	5,59	5,41	5,50	5,09	5,41	5,76	5,59	5,68
70%	6,77	7,36	7,09	6,36	6,14	7,00	7,00	6,73	7,09	6,77	6,73	7,00	7,10	7,41	7,36
80%	7,91	8,73	8,36	7,45	6,23	7,82	7,68	7,55	7,95	6,45	7,50	6,95	8,05	8,14	8,55
90%	9,00	9,68	9,59	8,23	6,64	9,18	8,36	9,09	9,55	5,59	8,59	8,45	8,90	9,18	9,59
100%	7,73	7,68	7,36	6,36	4,59	7,91	6,50	7,18	7,64	5,14	7,50	7,41	7,62	7,41	7,86

Tabelle 39 Dreiklang Einatmen links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	5,09	8,30	6,04	3,35	3,61	4,13	5,48	5,74	3,43	3,70	3,61	6,22	4,30	4,26	4,43
20%	3,78	6,30	4,09	2,57	2,48	3,13	3,65	3,96	2,61	3,04	2,96	6,35	3,17	3,09	3,26
30%	3,65	6,17	3,04	2,57	2,91	2,87	3,78	3,35	2,78	3,13	3,96	5,70	3,26	2,43	2,74
40%	3,78	5,48	3,22	3,78	3,83	3,39	3,78	3,74	3,57	4,04	4,61	5,91	3,30	3,39	3,09
50%	4,35	4,74	3,83	4,70	5,13	4,39	3,39	4,04	5,04	4,74	5,35	5,96	4,13	4,52	4,13
60%	5,87	4,09	5,39	6,00	5,78	5,96	5,00	5,26	6,96	6,00	6,74	5,61	6,52	6,30	6,39
70%	6,87	4,26	6,91	7,61	6,96	7,87	6,61	6,65	7,74	7,13	7,57	4,35	8,00	7,87	7,87
80%	8,17	4,43	8,48	9,00	8,52	8,65	7,70	7,87	8,57	8,30	8,39	4,96	9,00	8,74	9,00
90%	7,61	5,04	7,78	8,43	8,52	8,26	8,17	7,65	8,00	7,83	6,91	4,17	7,83	8,61	8,22
100%	5,83	6,17	6,22	7,00	7,26	6,35	7,43	6,74	6,30	7,09	4,91	5,78	5,48	5,78	5,87

Tabelle 40 Dreiklang Einatmen rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	4,35	8,48	6,22	2,83	2,61	4,17	4,30	4,30	4,09	3,74	3,26	7,09	5,04	4,70	5,26
20%	3,35	6,96	4,17	2,61	2,43	2,70	3,43	3,91	2,96	3,09	2,78	6,35	4,13	3,57	3,61
30%	3,70	6,30	3,09	2,65	2,65	3,09	3,78	3,43	2,78	3,17	3,70	6,70	3,22	2,74	3,13
40%	4,17	5,00	3,30	3,83	4,22	3,61	4,30	4,43	3,65	3,22	4,22	5,83	3,26	3,26	3,30
50%	4,48	4,22	4,22	5,09	5,09	4,70	4,30	4,65	5,04	4,83	5,22	4,96	5,17	4,91	4,17
60%	5,61	3,57	5,43	5,96	6,52	6,00	5,39	5,65	6,35	6,57	7,00	5,61	6,17	6,17	6,17
70%	7,26	3,96	6,48	7,78	7,65	7,39	6,57	6,78	7,48	7,09	8,13	3,91	7,26	7,70	7,35
80%	8,30	4,87	7,83	8,43	8,52	8,87	8,00	7,96	8,13	8,00	8,65	4,26	8,17	8,74	8,70
90%	7,57	5,43	8,17	8,70	8,35	8,35	8,17	7,78	7,96	8,00	7,26	4,87	7,43	8,00	7,96
100%	6,22	6,22	6,09	7,13	6,96	6,13	6,74	6,09	6,57	7,30	4,78	5,43	5,13	5,22	5,35

Tabelle 41 Dreiklang Übung links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	1,72	1,33	1,24	3,41	4,63	1,59	2,93	2,33	2,20	6,54	3,28	2,80	1,85	1,76	1,80
20%	2,33	2,07	2,15	2,72	3,67	2,11	2,63	2,24	2,02	5,46	2,67	2,67	2,15	2,20	2,37
30%	3,33	3,15	3,24	3,41	4,11	3,11	3,07	2,85	2,98	7,67	3,07	4,11	3,07	3,28	3,54
40%	4,33	4,20	4,54	4,02	3,72	4,33	3,93	4,41	4,33	5,59	3,85	4,63	4,11	4,15	4,41
50%	5,11	5,37	5,50	4,80	4,89	5,11	5,28	4,89	5,28	4,98	5,15	5,28	5,24	4,98	5,11
60%	6,33	6,54	6,93	6,11	5,50	6,33	5,93	6,28	6,54	5,28	5,67	5,85	6,33	6,41	5,72
70%	7,50	7,76	7,72	7,46	6,93	7,80	7,41	7,50	7,89	6,50	6,76	7,54	7,24	7,54	7,11
80%	7,37	8,07	7,80	7,50	7,20	7,93	7,28	7,98	7,76	4,80	7,50	7,07	7,72	8,24	7,72
90%	8,33	8,28	8,11	7,98	7,28	8,24	8,24	8,15	7,72	4,07	8,37	7,15	8,41	8,20	8,46
100%	8,67	8,24	7,76	7,59	7,07	8,46	8,28	8,37	8,28	4,11	8,67	7,89	8,89	8,24	8,76

Tabelle 42 Dreiklang Übung rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	1,89	1,28	1,59	3,20	4,80	1,85	2,41	2,28	2,50	7,20	2,93	3,46	2,07	2,02	1,50
20%	2,41	2,07	2,37	2,72	4,15	2,15	2,50	2,15	2,46	6,98	2,33	3,41	2,20	2,37	1,93
30%	3,33	3,24	3,15	3,02	4,02	3,11	3,28	2,85	2,76	7,41	3,28	3,24	2,89	3,15	3,02
40%	4,28	4,15	4,50	4,02	3,76	4,07	4,07	4,02	3,72	5,46	3,93	4,28	3,98	4,41	4,33
50%	5,15	5,20	5,37	5,02	4,59	5,28	4,85	4,98	5,15	4,72	5,07	5,59	5,24	5,20	5,63
60%	6,28	6,50	6,54	6,07	5,46	6,37	6,11	6,28	6,46	4,24	6,02	5,50	6,46	6,54	6,54
70%	7,41	7,54	7,41	7,50	6,72	7,80	7,24	7,63	7,59	5,02	7,41	7,02	7,80	7,67	7,63
80%	7,50	8,15	7,76	7,72	6,80	7,85	7,67	7,50	7,89	5,24	7,85	6,72	7,89	7,72	7,76
90%	8,33	8,72	8,28	8,15	7,63	8,15	8,20	8,33	8,11	4,67	7,72	7,67	8,07	8,07	8,28
100%	8,41	8,15	8,02	7,59	7,07	8,37	8,67	8,98	8,37	4,07	8,46	8,11	8,41	7,85	8,37

Tabelle 43 Tonleiter Einatmen links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	5,26	8,17	5,96	3,26	2,48	4,13	3,74	3,30	3,61	3,65	2,83	4,87	3,91	3,91	4,13
20%	3,83	7,30	5,22	3,09	2,48	3,70	3,87	3,52	3,61	3,22	4,13	4,57	4,57	3,43	3,91
30%	3,87	6,74	3,74	4,04	3,48	2,96	3,83	3,48	4,09	3,39	3,65	5,48	3,70	2,91	3,26
40%	4,35	5,57	3,65	4,43	4,70	4,17	4,91	4,35	4,22	3,65	4,17	5,70	3,52	3,39	3,52
50%	5,43	4,43	4,70	5,13	5,52	5,09	4,83	5,09	5,13	5,30	6,04	6,04	5,00	4,91	5,04
60%	6,17	4,04	5,35	6,61	6,87	6,57	6,52	6,39	6,57	6,04	6,78	6,22	6,70	6,57	6,52
70%	7,04	4,00	6,35	7,52	7,65	7,48	6,78	7,35	7,09	6,57	6,96	4,87	7,74	8,04	7,78
80%	7,30	3,78	7,04	8,04	8,09	7,52	7,52	7,78	7,35	7,09	7,43	5,43	7,61	8,39	8,26
90%	6,43	4,78	6,96	6,70	7,17	7,35	7,22	7,57	6,91	8,22	6,70	5,48	6,87	7,78	7,48
100%	5,30	6,17	6,04	6,17	6,57	6,04	5,78	6,17	6,43	7,87	6,30	6,35	5,39	5,65	5,09

Tabelle 44 Tonleiter Einatmen rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	4,78	7,70	6,30	3,57	2,96	4,30	3,26	3,52	3,87	4,04	2,26	6,00	5,13	4,78	4,57
20%	4,48	7,39	5,22	3,87	3,35	4,00	3,48	3,96	3,22	3,87	3,09	7,04	4,70	3,83	4,13
30%	4,30	6,04	4,43	3,30	3,30	3,09	4,13	3,70	3,48	3,57	3,30	5,48	4,04	3,65	3,70
40%	4,35	5,52	3,74	3,96	4,48	3,39	4,83	4,52	4,48	3,74	4,65	5,65	4,74	3,87	3,43
50%	4,78	4,13	4,52	4,74	5,43	4,61	5,30	5,83	6,00	4,30	6,00	5,39	5,65	4,91	5,00
60%	5,91	4,13	5,13	6,43	5,96	6,17	6,35	6,57	6,09	5,87	6,87	5,04	5,78	6,22	5,74
70%	7,00	4,48	6,13	7,17	7,70	7,35	6,74	6,61	7,57	6,52	7,78	4,48	7,61	7,87	7,30
80%	6,91	4,35	6,65	8,09	8,00	8,17	7,61	7,00	7,09	7,26	8,04	4,48	7,22	7,74	8,09
90%	7,04	4,78	6,87	7,30	7,26	7,87	6,78	7,22	7,26	7,83	6,87	4,91	5,83	6,96	7,26
100%	5,43	6,48	6,00	6,57	6,57	6,04	6,52	6,09	5,96	8,00	6,13	6,52	4,30	5,17	5,78

Tabelle 45 Tonleiter Übung links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	1,45	1,09	1,32	3,91	5,68	1,82	3,64	2,41	2,41	6,77	4,68	3,55	2,32	2,59	2,77
20%	2,32	2,00	2,27	3,09	5,23	2,27	3,82	3,23	2,73	5,41	3,91	4,14	2,41	3,09	2,86
30%	3,18	3,09	3,32	3,91	5,14	3,73	4,09	3,82	4,14	4,82	3,95	5,05	3,27	4,05	3,95
40%	5,00	5,18	5,64	5,86	6,50	5,73	5,64	5,86	5,18	5,68	4,68	5,05	4,45	5,82	5,50
50%	7,55	7,23	7,77	7,91	7,23	8,00	7,91	7,82	8,45	7,55	6,64	6,18	6,95	7,50	8,23
60%	6,68	6,77	6,91	7,05	6,27	7,27	6,73	7,14	7,09	5,14	5,91	5,77	7,00	6,91	6,68
70%	7,09	7,05	7,27	5,82	4,95	6,68	6,23	6,32	6,45	4,41	6,00	5,55	6,95	6,41	6,77
80%	7,32	7,41	7,27	5,59	4,41	6,82	5,86	6,18	6,55	4,27	6,09	6,50	7,27	6,64	6,32
90%	7,64	7,82	6,91	6,09	5,00	6,36	5,64	6,09	6,50	6,14	6,82	6,55	7,27	6,32	6,05
100%	6,77	7,36	6,32	5,77	4,59	6,32	5,45	6,14	5,50	4,82	6,32	6,68	7,09	5,68	5,86

Tabelle 46 Tonleiter Übung rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	1,95	1,18	1,73	3,64	5,95	1,77	3,82	3,64	2,36	6,86	5,14	4,32	2,18	2,32	1,64
20%	2,59	2,00	2,55	2,86	5,23	2,59	3,73	3,14	2,55	5,14	4,32	5,09	2,55	3,05	2,23
30%	3,59	3,68	3,91	4,32	5,55	3,73	4,64	4,14	4,05	4,68	4,05	5,14	3,27	3,64	3,64
40%	5,45	5,50	5,77	5,82	6,18	5,95	5,50	5,59	6,55	5,50	5,68	4,27	5,14	5,86	5,95
50%	7,64	7,05	7,77	7,82	6,91	7,95	6,86	7,23	7,50	6,64	7,14	4,32	7,09	7,41	7,95
60%	6,77	6,73	7,41	7,05	5,59	7,27	6,14	6,86	6,27	5,55	5,82	5,82	6,73	6,91	7,32
70%	6,91	6,82	7,00	6,14	5,27	6,50	6,18	6,09	6,50	4,59	5,64	5,18	6,86	6,23	6,82
80%	7,14	7,32	6,36	5,55	4,23	6,77	5,23	6,23	6,50	4,95	4,77	6,41	6,95	6,73	6,68
90%	6,50	7,59	6,64	6,14	5,27	6,41	6,73	6,18	6,73	6,59	5,82	7,45	7,05	6,50	6,55
100%	6,45	7,14	5,86	5,68	4,82	6,05	6,18	5,91	6,00	4,50	6,64	7,00	7,18	6,36	6,23

Tabelle 47 Schwellton Einatmen links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	5,39	5,74	5,52	8,91	7,13	6,65	4,09	6,04	3,74	4,09	3,35	4,30	4,87	5,00	5,61
20%	4,39	5,26	4,43	8,13	5,61	5,22	4,04	5,57	3,39	3,83	3,22	3,26	3,65	4,43	4,61
30%	3,39	4,22	3,70	7,09	4,52	4,35	3,35	6,09	2,87	3,09	2,83	2,91	3,52	2,74	3,26
40%	3,57	3,61	3,83	5,61	4,65	4,22	4,35	5,70	4,09	4,22	4,26	4,48	3,74	4,70	3,91
50%	4,00	4,00	3,96	5,04	4,61	4,83	4,65	4,52	4,91	4,35	5,30	4,91	4,70	4,65	4,13
60%	5,65	6,09	5,48	4,30	5,17	5,74	6,09	5,39	6,91	6,43	5,83	6,00	5,83	5,48	5,61
70%	7,35	7,65	7,57	3,74	5,78	6,83	6,39	5,22	8,35	8,17	7,39	7,22	7,70	6,22	7,17
80%	8,17	7,13	8,43	4,13	6,83	6,87	6,96	5,13	8,00	7,70	7,96	8,00	7,78	7,22	7,35
90%	7,48	6,96	7,39	3,70	6,26	5,91	7,74	5,43	6,39	7,17	7,87	7,65	7,22	7,39	6,83
100%	5,61	4,35	4,70	4,35	4,43	4,39	7,35	5,91	6,35	5,96	7,00	6,26	6,00	7,17	6,52

Tabelle 48 Schwellton Einatmen rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	6,22	6,22	5,52	8,87	7,43	6,00	3,57	6,35	3,61	4,83	3,30	4,26	5,30	4,30	4,70
20%	4,91	5,30	4,74	7,91	5,70	4,70	3,65	6,48	3,43	3,78	3,30	3,83	4,04	3,57	3,52
30%	4,52	4,61	4,30	6,13	4,61	4,04	3,65	6,00	3,26	3,35	3,52	3,48	3,43	4,13	3,96
40%	4,61	4,91	4,30	5,48	4,35	4,22	4,65	5,83	3,78	3,57	3,87	3,43	3,78	4,39	4,30
50%	4,65	4,61	4,39	5,17	4,00	5,00	5,26	5,13	5,70	4,35	5,26	4,74	4,74	4,39	4,52
60%	5,74	5,61	5,52	4,52	4,74	5,65	5,87	6,57	7,26	6,61	6,74	6,74	5,78	5,78	5,48
70%	6,39	6,65	6,87	4,04	5,96	6,35	6,52	5,04	8,17	7,52	7,00	7,09	7,17	6,43	7,00
80%	6,91	7,30	7,52	4,04	6,57	7,48	7,09	3,83	7,65	7,78	7,74	7,52	7,83	7,48	7,61
90%	6,61	5,87	7,13	4,13	6,78	6,39	7,35	4,22	6,26	7,26	7,30	7,52	7,17	7,52	7,35
100%	4,43	3,91	4,70	4,70	4,87	5,17	7,39	5,57	5,87	5,96	6,96	6,39	5,74	7,00	6,57

Tabelle 49 Schwellton Übung links

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	2,13	2,09	2,17	1,30	1,39	1,65	5,74	2,87	4,30	2,70	5,57	3,74	2,22	3,83	2,87
20%	1,74	1,74	1,57	2,09	2,00	1,96	5,13	3,39	2,52	2,22	3,65	2,35	1,52	2,61	2,22
30%	3,17	2,74	2,83	2,78	3,13	3,26	5,30	3,61	3,35	2,57	4,04	2,70	2,70	2,35	2,48
40%	4,26	4,17	4,04	4,00	4,61	4,22	6,09	4,13	4,30	4,17	4,57	3,70	4,35	4,00	4,17
50%	5,96	5,65	6,39	5,52	6,22	5,83	7,35	5,96	6,57	6,57	6,70	6,17	6,26	6,17	6,30
60%	7,04	6,87	6,91	6,70	6,96	6,65	7,13	5,83	7,13	7,22	6,83	7,22	7,52	7,30	7,17
70%	6,91	6,91	6,65	7,30	6,87	6,96	5,61	6,17	6,26	6,70	5,83	6,43	6,74	6,87	6,83
80%	7,13	7,26	7,13	7,83	7,30	6,96	4,74	7,17	6,22	6,70	4,91	6,48	7,00	6,83	6,52
90%	7,61	8,26	7,91	8,39	7,78	8,13	3,70	7,83	6,43	7,22	5,70	7,39	7,65	7,00	7,70
100%	9,04	9,30	9,39	9,09	8,74	9,39	4,22	8,04	7,91	8,96	7,22	8,83	9,04	8,04	8,74

Tabelle 50 Schwellton Übung rechts

	DP	ICO5	ICO8	OI	OE	RA	SCM	TD	PM	SA	MF	QL	EI	EL	LD
10%	1,43	2,13	2,04	1,35	1,57	2,00	6,09	2,65	3,83	2,65	4,83	3,13	2,17	3,78	3,17
20%	1,65	1,96	1,74	1,87	2,00	2,35	4,74	2,57	2,09	2,35	3,57	2,70	1,74	3,09	2,13
30%	2,96	3,13	2,91	2,96	3,09	3,52	6,13	4,39	2,78	2,96	4,09	3,17	3,43	2,70	2,65
40%	4,26	4,04	4,17	3,91	4,22	4,26	6,30	4,17	4,09	4,13	4,52	4,13	4,57	3,78	4,39
50%	6,00	5,39	5,96	5,61	5,87	5,43	7,74	5,35	6,26	6,13	6,87	6,26	6,52	5,91	6,17
60%	6,96	6,70	7,13	6,43	6,96	6,83	7,39	5,83	7,35	7,39	7,39	7,17	6,91	7,30	7,30
70%	6,96	6,87	6,83	7,57	6,87	6,74	5,87	6,22	6,39	6,52	5,83	6,65	6,61	6,78	6,65
80%	7,30	7,35	7,35	7,61	7,35	6,70	4,09	7,52	6,43	6,30	4,78	6,09	6,78	6,74	6,74
90%	8,04	8,04	8,00	8,52	7,91	8,13	3,00	7,96	7,26	7,39	5,96	7,09	7,30	7,26	7,35
100%	9,43	9,39	8,87	9,17	9,17	9,04	3,65	8,35	8,52	9,17	7,17	8,61	8,96	7,65	8,43

Danksagung

Ich möchte mich besonders bei meinem Betreuer Herrn PD Dr. med. Christoph Anders bedanken, der es mir ermöglichte, an diesem Projekt teilzunehmen und mir damit ein sowohl die Medizin als auch die Musik betreffendes Thema zur Promotion zur Verfügung gestellt hat. Auch für seine motivierende, fordernd-fördernde geduldige Unterstützung während der Datenverarbeitung möchte ich mich bedanken. Seine kritisch-konstruktiven Hinweise beim Erstellen der Arbeit haben mir immer neuen Ansporn gegeben, dieses Thema umfassend zu erarbeiten.

Auch den Mitarbeitern der AG Motorik des Funktionsbereiches Biomechanik gilt mein Dank für die Unterstützung bei den kleinen Tücken, welche die Arbeit mit abteilungseigenen PC-Programmen mit sich gebracht hat – vor allem auch für das angenehme Arbeitsklima, in welchem ich den Großteil meiner Promotion erstellen durfte.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Hartmut Zabel der Hochschule für Musik Carl-Maria von Weber Dresden für die Akquirierung der Probanden und für deren Motivation während der Untersuchungen sehr herzlich danken.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei den teilnehmenden Probanden für die Bereitschaft an der Untersuchung mitzuwirken.

Meinen Eltern danke ich für alles, was sie mir mit auf den Weg gegeben haben.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich- Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben:

PD Dr. med Christoph Anders (FSU Jena),

Prof. Hartmut Zabel (Hochschule für Musik Carl-Maria von Weber Dresden),

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Ort, Datum